
**НЕЛИНЕЙНАЯ
ДИНАМИКА
ГЛОБАЛЬНЫХ
ПРОЦЕССОВ
в природе
и обществе**

Lomonosov Moscow State
University
Faculty of Global Studies

NON-LINEAR DYNAMICS of GLOBAL PROCESSES in Nature and Society

Edited by

I. V. Ilyin, D. I. Trubetskov, A. V. Ivanov



Moscow
University Press
2014

Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
Факультет глобальных процессов

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ в природе и обществе

Под редакцией

И. В. Ильина, Д. И. Трубецкова, А. В. Иванова



Издательство
Московского университета
2014

Авторы:

*И.А. Алешковский, А.В. Иванов, И.В. Ильин, А.А. Короновский,
Л.М. Страхова, А.Д. Трубецков, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов,
И.А. Яшков*

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *С.Ю. Малков*
(Институт экономики РАН, г. Москва),
д-р физ.-мат. наук, профессор *М.Г. Дмитриев*
(Российский государственный социальный университет, г. Москва)

Нелинейная динамика глобальных процессов в природе и обществе / Под ред. И.В. Ильина, Д.И. Трубецкова, А.В. Иванова. — М.: Издательство Московского университета, 2014. — 456 с.

ISBN 978-5-19-010838-5

В монографии рассматриваются глобальные процессы в неживой природе, органическом мире и социальной жизни с позиций нелинейной динамики. Обсуждается современная картина мира и место нелинейной науки в ней, приводится классификация глобальных процессов эволюции Земли, жизни и общества, а также мировой экономики и политики.

Для широкого круга специалистов в области наук о Земле и обществе, а также моделирования глобальных процессов. Книга будет полезной также аспирантам и студентам вузов, чья будущая профессия связана с глобальными процессами, системами и проблемами.

Ключевые слова: нелинейная наука, базовые модели, урбосфера, логистическое уравнение, модель Лотки-Вольтерры, сетевые модели.

УДК 349.6
ББК 67

Nonlinear Dynamics of Global Processes in Nature and Society / Ed. by I.V. Ilyin, D.I. Trubetskov, A.V. Ivanov. — Moscow: Moscow University Press, 2014. — 456 p.

Global processes in inanimate nature, organic world and social life from a perspective of nonlinear dynamics are considered in this monograph. Modern worldview and place of nonlinear science in it are discussed, classification of global Earth, life and society evolution processes as well as world economy and politics evolution processes is stated.

This monograph is intended for a wide range of specialists in Earth and society science as well as for specialists of global processes simulation. The book will be also useful for post-graduates and students, whose profession is connected with global processes, systems and problems.

Key words: nonlinear science, basic models, urban sphere, logistic equation, Lotka-Volterra equation, network models.

© И.А. Алешковский, А.В. Иванов, И.В. Ильин,
А.А. Короновский, Л.М. Страхова,
А.Д. Трубецков, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов,
И.А. Яшков, 2014

© Факультет глобальных процессов МГУ, 2014

© Издательство Московского университета, 2014

ISBN 978-5-19-010838-5

Предисловие.....	8

Часть I. Глобальные процессы в природе

Глава 1. Современная естественно-научная картина мира и место в ней нелинейной науки	17
1.1. Современная картина мира и место в ней эволюционизма.....	17
1.2. Расширяющаяся Вселенная.....	23
1.3. Нелинейная наука, синергетика и теория самоорганизации	39
1.4. Эволюция биосферы и ноосфера	52
Глава 2. Нелинейные свойства и моделирование глобальных геопроцессов	63
2.1. Вводные замечания	63
2.2. Физика, синергетика и науки о Земле	74
2.3. Нелинейные эффекты в рельефе Земли.....	78
2.4. Нелинейные подходы к построению геофизической модели геологической среды	84
2.5. Базовые глобально-геодинамические модели	93
2.6. Фрактально-ячеистая структура геосфер Земли	108
2.7. Кризисные и катастрофические явления в геосистемах	124
2.8. Моделирование глобального геопроцесса — цунами.....	127
2.9. Ритмичность глобальных геофизических процессов в истории эволюции Земли.....	131
2.10. Глобально-климатические модели	140
Глава 3. Эволюция жизни на примере формирования разнообразия биологических видов как яркий пример глобального развития.....	162
3.1. Разнообразие биосферы и эволюции биологических видов	162
3.2. Исторический экскурс в проблему эволюции видов	166
3.3. Нелинейные модели, описывающие закономерности возникновения и вымирания биологических видов	184
3.4. Об одной компьютерной модели биологической эволюции	209
Глава 4. Нелинейные эффекты в урбосфере	223
4.1. Урбосфера как глобальная система.....	223
4.2. Нелинейность в городах	226
4.3. Самоорганизация городских сетей.....	237

Часть II. Глобальные процессы в обществе

Глава 5. Глобализация и предпосылки ее моделирования	245
Глава 6. Моделирование глобального развития	299
6.1. Как возникает нелинейность в социальных и экономических системах ..	299
6.2. Модели «мировой динамики» для описания глобального развития	304
6.3. О моделях «ядерной зимы».....	315
Глава 7. Логистическое уравнение как базовая модель для описания глобальных процессов.....	320
7.1. Модель распространения заболевания	320
7.2. Простейшие модели роста численности популяций и народонаселения: экспоненциальный и логистический рост	325
7.3. Логистическое уравнение как модель для описания технологического прогресса и динамики человеческого общества.....	331
7.4. Нелинейные модели Вайдлиха и их применение к анализу глобальных экономических и социальных задач.....	335
Глава 8. Глобальные процессы, описываемые моделью Лотки-Вольтерры и сходными с ней.....	355
8.1. Вводные замечания на основе экологических примеров.....	355
8.2. Моделирование классовой борьбы.....	361
8.3. Модель описания бесклассового общества	361
8.4. Модели военных действий	362
8.5. Простейшая вирусная модель инфекционного заболевания	364
8.6. Сходные модели распространения эпидемий.....	366
8.7. Обобщенная модель Лотки-Вольтерры для описания взаимодействия когнитивных и/или эмоциональных мод мозга	369
Приложение 1 к главе 8	372
Приложение 2 к главе 8	380
Глава 9. Глобальные процессы, связанные с ростом народонаселения Земли	382
9.1. Диффузионная модель роста численности народонаселения, учитывающая «распределенность» ареалов проживания.....	384
9.2. Анализ динамики численности народонаселения отдельных стран и модель «решеточного газа» для объяснения выявленных закономерностей ..	391
9.3. Феноменологическая модель С.П. Капицы роста населения мира	403
9.4. Динамика роста мировой урбанизации	410
9.5. Модели миграции	414
Глава 10. Мировое сообщество и глобальная экономика как нелинейные динамические системы	425
10.1. Сетевые модели и их применение	425

10.2. Величины, характеризующие сети	429
10.3. Пример взвешенной сети — сеть международной ассоциации воздушного транспорта	438
10.4. Иные реальные сети.....	441
10.5. Пространственно-распределенные сети	446
10.6. Моделирование сетей.....	449
Заключение	452



Предисловие

Можно только удивиться прозорливости геолога, химика, биолога, создателя учения о ноосфере и биогеохимии Владимира Ивановича Вернадского, предсказавшего огромное будущее и опасность ядерной энергии задолго до того, как в этой области были сделаны основополагающие открытия.

Г.Г. Малинецкий¹

Вернадский был ученым-энциклопедистом, и ему нет равных в XX в. по разнообразию областей, в которых он оставил глубокий след.

С.Р. Микулинский²

Процессы глобализации, пережившие бум интереса к себе в XX в., перетекли и в следующий век, где-то сохранив преемственность, где-то видоизменившись или возникнув вновь, но осталось неизменным то, что по-прежнему глобализация — это одно из самых обсуждаемых явлений XXI века. Проникнув во все сферы жизнедеятельности человека, глобальные процессы меняют нашу планету, политический расклад, экономическое развитие, экологические условия проживания, информационное взаимодействие, оказываясь в сложных взаимопроникающих отношениях с наукой, медициной, образованием. Их значимость определяется силой воздействия на социальные, политические, экономические, климатические, научные, инженерные, медицинские сферы, в центре которых стоит человек и от развития которых зависит судьба всего человечества. «Глобализацию можно сравнить с набирающим силу тайфуном, который необратимо втягивает в орбиту своего нарастающего круговорота все новые территории и государства, виды человеческой деятельности и общения», — отмечает Э. Азроянц (Азроянц, 2002).

Научный и обывательский интерес к глобальным процессам прежде всего обусловлен их стремительным развитием, повсеместным влиянием и потребностью предугадать, в каком же мире мы проснемся завтра. Неоспоримость влияния глобализации на дальнейшее развитие жизни на Земле признается большинством как исследователей, так и простых граждан, однако отношение

¹ Пространство синергетики: Взгляд с высоты. М.: ЛИБРОКОМ, 2013. С. 12.

² В.И. Вернадский как источник науки // В.И. Вернадский. Труды по всеобщей истории науки. 2-е изд. М.: Наука, 1988. С. 20.

к процессам глобализации в глобальном обществе разноректорно. Таким образом, существуют очевидное, признанное, осязаемое явление, делимое в своем многообразии, с одной стороны, и многочисленные попытки разобраться в нем, упорядочить, обозначить и даже построить различные футурологические прогнозы — с другой. Таких попыток — множество, причем как в научном сообществе, так и в гражданском обществе тема глобализации чрезвычайно популярна.

Осмысление глобальных явлений происходит на страницах научных изданий, на постоянно действующих семинарах в различных университетах мира, на конференциях, проходящих во всем мире, демонстрирующих наряду с крайней заинтересованностью глобальными системами, процессами, проблемами огромное разнообразие в подходах к их изучению. Пожалуй, единственно сходной позицией является то, что современная наука в целом понимает под глобализацией одну из наиболее важных тенденций развития мира.

Заинтересованность глобальными явлениями и процессами проявляют политики и бизнесмены, обсуждая их на ставших уже регулярными мировых форумах и встречах «в верхах». Не остается в стороне и пресса, постоянно поддерживающая интерес к глобальным процессам, и интернет-пользователи, обсуждающие те же проблемы (это явление как один из ярких феноменов глобального мира также выступает важным предметом для изучения). И, наконец, существует творческое осмысление глобализации, находящее свое отражение в кино, литературе и даже музыке. Одним из примеров последнего являются вышедшие в 2009 г. музыкальные альбомы Джеймса Забелы *Global Process* и Пуша *Global Age*. Слово «глобализация» прочно вошло в языки мира, в различные мировые культуры, т.е. все это означает, что современному человеку необходимо осмысление этого явления, необходимо понять свою роль и правильно выстроить ожидания.

Авторы работы ставят своей целью представить возможности моделирования в изучении глобальных процессов, причем изложение ведется в корректном сочетании описательности с математическими выкладками (наиболее сложные отнесены в приложения), что делает книгу доступной для гуманитариев. Издание представляет историческую канву в осмыслении глобальных процессов, показывает возникновение и развитие понимания угроз современного мира, таких как расточительное отношение к различным земным ресурсам, загрязнение окружающей среды. Ис-

следуются механизмы противодействия этим угрозам. Показана деятельность такой глобальной организации, как Римский клуб, в рамках которого и были представлены первые модели, демонстрирующие возможные сценарии развития жизни на планете Земля, охваченной глобальными процессами. С течением времени эти сценарии были пересмотрены, стали очевидными их недостатки. В соответствии с открывшимися новыми возможностями моделирования появились и новые научные разработки, тем не менее, ценность первых моделей неоспорима и прежде всего потому, что они привлекли внимание не только ученых, но и широкие социальные круги к глобальным проблемам и показали пути их исследования и преодоления.

Основой для математического моделирования глобальных процессов в нашей книге выбраны модели и методы нелинейной динамики. Для дальнейшего изложения отобраны лишь поистине глобальные, но достаточно простые модели, которые можно представить, объединив их в следующие четыре группы: 1) модели нелинейной динамики общества, в частности различные варианты «Мировой динамики» Форрестора; модели распространения эпидемий в человеческом обществе; экономические модели; 2) модели роста населения Земли; 3) модель эволюции жизни с момента ее возникновения на Земле до настоящего времени; 4) нелинейные свойства и модели геосистем. Новые возможности моделирования, представленные в книге, охватывают самые разнообразные сферы — от социальной проблематики до природных явлений.

Нет сомнения в том, что исследование глобальных процессов — междисциплинарная проблема, решение которой важно и востребовано современным обществом. В книге, из которой взят первый эпиграф, есть раздел «Российский контекст междисциплинарности». В нем автор, говоря о России, пишет следующее: «Во-первых, дело в традиции. Перед российским ученым или государственным деятелем, решившим опираться на знание, на технологии, заниматься модернизацией, говоря современным языком, сразу встает множество проблем... Но главная черта — огромное, неукротимое желание сделать Дело, возвеличить Россию, используя для этого всевозможные средства» (С. 11). Далее в книге идет перечисление великих «междисциплинарников» — Петр I, М.В. Ломоносов, Д.И. Менделеев и, конечно, В.И. Вернадский. Наша книга выходит в год 150-летия со дня рождения В.И. Вернадского, и мы посвящаем ее памяти этого удивительного человека, заложившего основы глобальных исследований.

Пожалуй, энциклопедичность Владимира Ивановича наиболее отчетливо проявляется в его лекциях по истории науки, из которых ясно следует, что трудно найти область знаний, не интересную для него. Эти лекции и ряд трудов по истории науки были опубликованы в книге «Избранные труды по истории науки» в 1981 г. К 125-летию В.И. Вернадского книга была переиздана в 1988 г. под названием «Труды по всеобщей истории науки». Можно утверждать, что В.И. Вернадского считали бы великим ученым, если бы даже у него не было никаких работ, кроме трудов по истории науки. В.И. Вернадский придавал большое значение изучению истории человеческих знаний.

В книге 1988 г. он писал (С. 217—218): «Научная творческая мысль как в вызывающем ее механизме — рождении талантливых ее создателей, так и в ее проявлении — изменении ею энергетики планеты входит в неразрывную связь, всецело, в комплекс процессов биосферы, подлежащих изучению наук о природе, в область их методов исследования. Для натуралиста-эмпирика является аксиомой, неразрывно связанной со всей его мыслью и с формой его научной работы, что такие проявления не могут быть случайными, а столь же подчинены весу и мере, как движение небесных светил или ход химических реакций. В своей работе он не может не искать механизма, связывающего их с окружающим... Это задача истории знаний, исследования во времени научного мышления и научного искания. Значение этой дисциплины становится чрезвычайным, когда перед нами разворачивается захватывающее в себя и нас, входящее в область ее ведения грандиозное природное явление. Мне кажется, что именно такое явление суждено нам сейчас переживать, что мы живем в особую эпоху, находимся на гребне взрывной волны научного творчества. Всматриваясь в него и его изучая, мы не можем не выйти мыслью в будущее, не можем не думать о дальнейшем выявлении в жизни человечества наблюдаемого нами явления. Мы видим, что вступили в особый период научного творчества. Он отличается тем, что одновременно почти по всей линии науки в корне меняются все основные черты картин космоса, научно строяемого».

Удивительные строки! Впечатление, что они написаны вчера или даже сегодня: благодаря удивительным успехам современной космологии меняется на глазах естественно-научная история мира. Открыто космическое ускорение, которое испытывают галактики в своем движении (Нобелевская премия по физике 2011 г. «За открытие ускоряющегося расширения Вселенной по наблюдениям

сверхновых звезд»); открыты антитяготение и темная энергия; открыты экзопланеты; найден бозон Хиггса, что подтверждает стандартную модель элементарных частиц; появились подкрепленные экспериментами сомнения в копенгагенской трактовке квантовой механики; продолжают удивлять открытия в наномире и генетике. И все перечисленное следует отнести к глобальным процессам, исследуемым на основе междисциплинарных подходов.

И еще одна цитата из статьи В.И. Вернадского «Несколько слов о ноосфере» (Успехи современной биологии. 1944. Т. 18. Вып. 2. С. 119): «Важен для нас факт, что идеалы нашей демократии идут в унисон со стихийным геологическим процессом, с законами природы, отвечают ноосфере. Можно смотреть поэтому на наше будущее уверенно. Оно в наших руках. Мы его не выпустим». Очень хочется, чтобы сказанное Владимиром Ивановичем подтвердилось и человечество сумело направить мировую динамику в нужном направлении.

В.И. Вернадский задолго до Чарльза Сноу проповедовал объединение двух культур — естественно-научной и гуманитарной на основе единого научного метода, которым сейчас является нелинейная наука, а в ней междисциплинарное направление — синергетика с акцентом на самоорганизацию. Он неоднократно подчеркивал, что путь к ноосфере возможен только через народное образование. Вскоре после Октябрьской революции он писал (Леонтович А. Альтернатива Вернадского // Поиск. 2013. 1 февр. С. 14): «Я думаю, что в значительной мере все переживаемое находится в тесной связи с той легкомысленной небрежностью, с какой русское общество поколениями относилось к народному образованию. В народном образовании заинтересованы государство, семья, человеческая личность, общественные организации. С ним связаны теснейшим образом такие великие творения духовной жизни человечества, как наука, философская мысль, религия, художественное творчество...»

И эти слова звучат удивительно современно.

В упомянутой газетной статье автор особо подчеркивает этику В.И. Вернадского. «Когда читаешь его труды, в которых впервые выдвигаются его революционные научные идеи, невольно ловишь себя на ощущении, что сам-то Вернадский ничего нового не сделал. Это ощущение возникает благодаря обширному обзору, которым автор всегда предварял собственные мысли и в котором со скрупулезной тщательностью упоминал всех своих предшественников, так или иначе затрагивавших эту тему. Кажется, что глав-

ным для Вернадского было никого не забыть, высказать свое отношение к словам каждого, кто работал до него». А. Леонтович справедливо отмечает, что такой подход особенно важен в наше время интернет-культуры и эпохи заимствований.

В одной из статей Г.Г. Малинецкого приведена схема рождения современной междисциплинарности (рис. 1). Наша книга относится к заштрихованной части и по специальностям авторов, и разнообразию задач (предметные знания), и по использованию математического моделирования.

Эта книга — наш скромный вклад в память о великом энциклопедисте всех времен. Она подготовлена учеными трех научно-образовательных центров: факультета глобальных процессов МГУ имени М.В. Ломоносова, факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского и факультета экологии Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина. Авторами изначально принят междисциплинарный подход к исследованию глобальных процессов, сочетающий математическое моделирование и предметные гуманитарные и естественно-научные знания.

В предисловии к нашей предыдущей книге (Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010) она позиционировалась как «первый и очень важный шаг на пути к последовательному изложению идей, методов и результатов моделирования глобальных процессов с использованием аппарата нелинейной динамики» и предлагалось, следуя step by step, создать серию книг в данном направлении. И вот вторая книга предлагается вниманию читателя. Символично, что монография выходит практически одновременно с книгой Йоргена Рандерса и докладами его и Денниса Медоуза Римскому клубу в 2012 г. под названием «2052. Глобальный прогноз на следующие 40 лет», краткую информацию о которых мы приводим в Заключение.

В недавнем интервью профессора Санкт-Петербургского университета доктора филологических и биологических наук Т.В. Черниговской (Наука и жизнь. 2012. № 11. С. 26—33) на во-



Рис. 1. Заштрихованная часть — междисциплинарные исследования

прос о том, как готовить широко образованных специалистов, способных вести междисциплинарные исследования, звучит ответ: «Мы уже начали их готовить. Есть НБИК-факультеты». НБИК — это «нано, био, инфо, когно». Бренд НБИК возник не сейчас и не здесь, есть НБИК-факультеты в Италии и в США. Наши НБИК-факультеты существуют на базе Курчатовского национального исследовательского центра. Но в XXI в. благодаря стремительному развитию технологий упомянутый квартет уже предложили заменить на «социо, когно, био, инфо, нано», где на первый план выходят социогуманитарные технологии и придётся говорить об аббревиатуре «СКБИН-факультет». Последнему вполне соответствует содружество факультетов, представляемых авторами данной книги (глобальных процессов, нелинейных процессов, экологии), относящихся к разным вузам, но активно междисциплинарно взаимодействующих. Книга во многом охватывает новую аббревиатуру, хотя в ней нет, к сожалению, «инфо» и «нано». Видимо, стоит посвятить глобальным процессам, связанным с информационно-телекоммуникационными системами и нанотехнологиями, отдельное исследование.

Работы по нелинейному моделированию глобальных процессов в последние годы активно развиваются на факультете глобальных процессов МГУ, который становится одним из мировых центров глобальных междисциплинарных исследований. Международный научный конгресс «Глобалистика», проведенный факультетом в 2009 и 2011 гг., стал одной из крупнейших мировых площадок обсуждения результатов глобальных исследований. В 2012 и 2013 гг. факультет совместно с Консорциумом глобальных исследований, объединяющим более 30 вузов США, КНР, стран Европы, Азии, Латинской Америки и Австралии, организовал в МГУ очередные международные конференции Консорциума. В октябре 2013 г. состоялся становящийся уже традиционным Международный научный конгресс «Глобалистика», который на этот раз был посвящен 150-летию со дня рождения нашего выдающегося соотечественника, одного из основоположников мировой глобалистической мысли академика В.И. Вернадского. На этих крупных научных мероприятиях состоялось широкое обсуждение в том числе проблем моделирования глобальных процессов в природе и обществе.

Часть I

ГЛОБАЛЬНЫЕ
ПРОЦЕССЫ
В ПРИРОДЕ

Глава 1

СОВРЕМЕННАЯ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНАЯ КАРТИНА МИРА И МЕСТО В НЕЙ НЕЛИНЕЙНОЙ НАУКИ

1.1. Современная картина мира и место в ней эволюционизма

Сегодня можно говорить о целостной картине мира, объединяющей представления о неживой природе, органическом мире и социальной жизни на основе единых общенаучных принципов. Общенаучная картина мира строится в настоящее время на основе универсального эволюционизма, объединяющего идеи системного и эволюционного подходов к анализу глобальных процессов (см. например, Степин, 2001; Ильин, Урсул, 2007).

Физика всегда претендовала на формирование основы общенаучной картины мира, но не включала большую часть своей истории в фундаментальные принципы своего развития. Биология, которая занимается как раз развитием, только сейчас создает основы своей теории. Ее представления, связанные с живой природой, традиционно не считались фундаментом мироздания.

Несовместимость парадигм классической физики и биологии обнаружилась еще в XIX в. как противоречие между эволюционной теорией Дарвина и вторым началом термодинамики: биологическая теория говорила о создании в процессе эволюции все более сложных и упорядоченных живых систем, а термодинамика — о разрушении, о непрерывном росте энтропии¹, т.е. о непрерывном уничтожении порядка.

Возможность разрешить эти противоречия появилась только в последней трети прошлого века. Универсальный (глобальный) эволюционный принцип, позволивший найти путь к такому решению, часто понимают как экстраполяцию идей биологической эволюции в астрономию, науки о Земле, на все сферы действи-

¹ Напомним, что энтропия — мера порядка в системе. Полный порядок соответствует минимуму энтропии, в то время как любой беспорядок увеличивает ее. Физический смысл возрастания энтропии в изолированных системах (системах, имеющих постоянную энтропию) такой: если нет внешних воздействий, система стремится перейти в состояние, в котором при данных условиях будет больший беспорядок.

тельности, на неживую, живую и социальные материи (Урсул, 2007).

Напомним некоторые сведения о теории Дарвина (Специальный выпуск журнала «Природа». 2009. № 3; Браун, 2009).

В 2009 г. мир отметил 200-летие со дня рождения Чарльза Дарвина (12.02.1809 — 19.04.1882) — человека, оказавшего сильное влияние на все человечество, на наше понимание мира, в котором мы живем, на наше собственное место в этом мире. В том же году исполнилось 150 лет с момента выхода в свет книги на все времена «Происхождение видов путем естественного отбора, или Сохранение благоприятных рас в борьбе за жизнь», которая впервые была опубликована 24 ноября 1859 г.

Как пишет Джанет Браун (Браун, 2009), «без сомнения, “Происхождение видов” Чарльза Дарвина — одно из величайших существующих научных произведений. Оно создано не в том стиле, в каком пишут научные книги в наши дни. Напротив, это исследование удивительно личностное. Вы не найдете там ни схем, ни математических вычислений, ни одетых в белое фигур в лаборатории, ни непонятных социальных слоев и выражений... Работа “Происхождение видов” разошлась мгновенно в день публикации... С самого начала было ясно: Чарльз Дарвин внес выдающийся вклад в развитие интеллектуальной сферы, неизмеримый по глубине, полный внутреннего содержания с очевидными доказательствами правоты предположений... “Происхождение видов” Дарвина хоть и воспринималось противоречиво, но никогда не ограничивалось образом холодного, тайного и понятного лишь немногим научного издателя. Его история — это, во многом, история современного мира».

Чарльз Роберт Дарвин (*Charles Robert Darwin; 1809–1882*) — английский натуралист и путешественник — родился 12 февраля 1809 г. в Шрусбери (графство Шропшир). К тому времени, как он поступил в дневную школу в 1817 г., восьмилетний Дарвин уже приобщился к естественной истории и коллекционированию. Перед тем как отправиться со своим братом Эразмом в университет Эдинбурга, летом 1825 г., он выступает в роли ассистента-ученика и помогает отцу в его медицинской практике, оказывая помощь беднякам Шропшира.

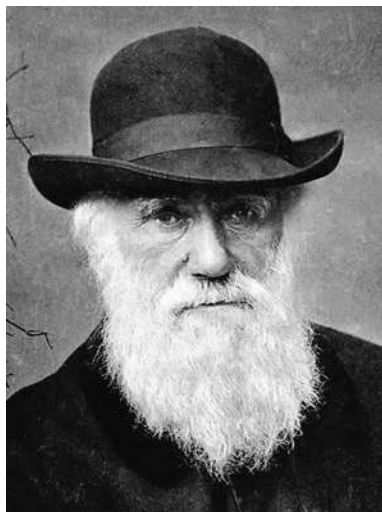
В 1831 г. по окончании университета Дарвин в качестве натуралиста отправился в кругосветное путешествие на экспедиционном судне королевского флота «Бигль», откуда вернулся в Англию лишь 2 октября 1836 г. Большую часть времени Дарвин проводит на берегу, изучая геологию и собирая коллекции по естественной истории, в то время как «Бигль» под руководством Фицроя осуществлял гидрографическую и картографическую съёмку побережья. В течение путешествия он тщательно записывает свои наблюдения и теоретические выкладки. Вскоре после возвращения Дарвин издал книгу, известную под сокращённым

названием «Путешествие натуралиста вокруг света на корабле “Бигль”» (1839). Она имела большой успех, и второе, расширенное издание (1845) было переведено на многие европейские языки и множество раз переиздавалось.

Дарвин принял также участие в написании пятитомной монографии «Зоология путешествия» (1842). Как зоолог Дарвин выбрал объектом своего изучения усоногих раков и вскоре стал лучшим в мире специалистом в этой области. Он написал и издал четырёхтомную монографию «Усоногие раки», которой зоологи пользуются до сих пор. Но всемирную славу Дарвину принесли его работы по эволюции живой природы.

Чарльз Дарвин одним из первых осознал и наглядно продемонстрировал, что все живые организмы эволюционируют во времени от общих предков. В своей теории, первое развёрнутое изложение которой было опубликовано в 1859 г. в книге «Происхождение видов» (полное название: «Происхождение видов путём естественного отбора, или выживание благоприятствуемых пород в борьбе за жизнь»), основной движущей силой эволюции Дарвин назвал естественный отбор и неопределённую изменчивость. Существование эволюции было признано большинством учёных ещё при жизни Дарвина, однако его теория естественного отбора как основное объяснение эволюции стала общепризнанной лишь в 30-х гг. XX столетия. Идеи и открытия Дарвина в переработанном виде формируют фундамент современной синтетической теории эволюции и составляют основу биологии как обеспечивающие логическое объяснение биологического разнообразия.

Чарльз Дарвин был удостоен множества наград от научных обществ Великобритании и других европейских стран. Умер Дарвин в Дауне (графство Кент) 19 апреля 1882 г.



Сам Дарвин называл свою книгу одним длинным доказательством эволюции. Впоследствии его концепцию стали называть дарвинизмом. Удивительно, насколько книга современна, насколько легко встраиваются в нее новейшие открытия в генетике, биологии развития, молекулярной биологии, геологии, палеонтологии и исторической географии (Специальный выпуск журнала «Природа». 2009. № 3). В книге можно заменить факты, приведенные Дарвином, на факты последних лет, но останутся теми же логика книги, ее основные выводы и заключения.

С позиций анализа глобальных процессов методами нелинейной науки наиболее интересна третья глава книги, где Дарвин пишет о неизбежности борьбы за существование, которая продол-

жается непрерывно. В интересной статье П.М. Бородина «Перечитывая “Происхождение видов”» есть раздел «Борьба за существование». Приведем цитату из статьи.

«Усовершенствование любого вида в экосистеме ведет к ухудшению условий для других видов, поэтому, чтобы выжить, все виды, входящие в экосистему, должны непрерывно эволюционировать. Эта закономерность получила название “принцип Красной Королевы” (по имени героини книги Л. Кэрролла “Алиса в зазеркалье”), который гласит: “В этом мире нужно бежать изо всех сил только для того, чтобы остаться на месте”, и отражает самое существо борьбы за существование. Большинство живых организмов погибает или исключается из размножения не под действием физических факторов, а в результате влияния других видов — паразитов, хищников, конкурентов. Климат меняется постоянно и непредсказуемо, но не обязательно во вред живым организмам. Хищник во вред жертве совершенствует свои методы охоты, а жертва во вред хищнику совершенствует способы защиты от него. Паразит меняется таким образом, чтобы использовать максимум ресурсов из организма хозяина, а тот совершенствует средства борьбы с паразитом... Всем видам, входящим в экосистему, приходится бежать из всех сил, только для того, чтобы остаться на месте — приходится постоянно меняться, чтобы сохранить место в экосистеме».

Дарвин понимает борьбу за существование весьма широко, о чем и пишет в «Происхождении видов» (см., например, Дарвин, 1987).

«...Про растение, ежегодно производящее тысячу семян, из которых в среднем вызревает лишь одно, еще вернее можно сказать, что оно борется с растениями того же рода и других, уже покрывающими почву. Омела зависит от яблони и еще нескольких деревьев, но было бы натяжкой говорить о ее борьбе с ними только потому, что если слишком много этих паразитов вырастит на одном дереве, оно захиреет и погибнет. Но про несколько сеянцев омелы, растущих на одной и той же ветви, можно совершенно верно сказать, что они ведут борьбу друг с другом. Так как омела рассеивается птицами, ее существование зависит от них, и, выражаясь метафорически, можно сказать, что она борется с другими растениями, приносящими плоды, тем, что привлекает птиц пожирать ее плоды и таким образом разносить семена¹. Во всех этих значе-

¹ У поэта Бориса Заходера есть забавное стихотворение «Эволюция эволюции» (Заходер, 1997) на тему одной из ситуаций, описанных Дарвином:

ниях, нечувствительно переходящих одно в другое, я... прибегаю к общему термину “Борьба за существование”».

Дарвинизм в его современном понимании, опираясь на традиционные положения и популяционную генетику, остается основой естествознания и научной картины мира. Заметим, что именно естественный отбор объясняет феномен «стрелы времени» и прогрессивное развитие биосферы.

Академик Н.Н. Моисеев считал, что действие всех природных и социальных законов можно представить как постоянный отбор, когда из множества возможностей выбираются лишь некоторые классы и состояния. В этом смысле все динамические системы¹ обладают способностью «выбирать», хотя конкретные результаты «выбора», как правило, нельзя предсказать заранее.

Н.Н. Моисеев выделил два типа механизмов такого «выбора»: адаптационные, под действием которых система не приобретает новых свойств, и бифуркационные, связанные с радикальной перестройкой системы.

Он сформулировал принцип экономии энтропии: в направленном самоорганизующемся процессе «преимущество» получают сложные системы, а не простые, поскольку именно они позволяют утилизировать внешнюю энергию в наибольших масштабах, наиболее эффективно.

Никита Николаевич Моисеев (23 августа 1917 — 29 февраля 2000) — советский и российский учёный в области общей механики и прикладной математики, академик Академии наук СССР (впоследствии РАН) и ВАСХНИЛ (впоследствии РАСХН). Автор 35 монографий, 10 учебных пособий и более 300 научных и научно-популярных статей. Учась в школе, Н.Н. Моисеев увлекался математикой — посещал математический кружок в Математическом институте им. Стеклова. По окончании школы поступил в Педагогический институт и проучился в нём первый курс, после которого в 1935 г. поступил в МГУ. В 1941 г. Н.Н. Моисеев

Иногда,
Говорят,
Выживает
Не тот,
Кто других выживает,
А тот,
Которого он выживает.
И так иногда бывает.

¹ Динамическая система — математический объект, соответствующий реальным физическим, химическим, биологическим и другим системам, эволюция во времени которых на любом интервале времени однозначно определяется начальным состоянием.



окончил механико-математический факультет МГУ по специальности «функциональный анализ».

В 1946–1948 гг. Н.Н. Моисеев работает старшим инженером НИИ-2 Минавиапрома, преподает в Военно-воздушной инженерной академии им. Жуковского. В 1948 г. защищает диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук. С 1949 г. Никита Николаевич преподаёт на кафедре реактивной техники МВТУ им. Баумана (здесь же читали спецкурсы известные ученые в области космической техники С.П. Королёв, В.Н. Челомей, В.П. Бармин), затем работает старшим преподавателем, доцентом и, наконец, и.о. заведующего кафедрой теоретической механики Ростовского государственного университета.

В начале 1950-х гг. Н.Н. Моисеев поступает в докторантуру Математического института им. Стеклова и в 1955 г. защищает диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

В 1956 г. Н.Н. Моисеева назначают профессором кафедры математики Московского физико-технического института, где он организует факультет управления и прикладной математики и становится его первым деканом. Одновременно он работает старшим научным сотрудником, заведующим лабораторией Вычислительного центра АН СССР, а в 1967–1985 гг. назначается заместителем директора по научной работе ИВЦ АН СССР. Под его руководством выполнены знаменитые исследования по разработке математической модели последствий ядерной войны — «ядерная зима». Скончался 29 февраля 2000 г. после тяжёлой продолжительной болезни.

Основными направлениями исследовательской деятельности Н.Н. Моисеева являлись: теории системного анализа и оптимальных систем; прикладная математика и её приложения для решения сложных задач физики и техники; теория управления и методы оптимизации, в том числе природопользования; модели динамики биосферы и её стабильности при антропогенных воздействиях (в 1983 г. были получены количественные оценки возможных последствий ядерной войны, известные как «ядерная зима» и «ядерная ночь»); философия естествознания, в том числе методологические проблемы взаимоотношения биосферы и общества и математические модели стабильности биосферы в условиях антропогенных воздействий; философские и политологические проблемы общества в условиях переходного периода России, процессов самоорганизации (или универсального эволюционизма, по терминологии Н.Н. Моисеева) и необратимости эволюционных процессов.

В современной научной картине мира основную роль играют представления:

- о расширяющейся Вселенной;
- о нелинейности мира;
- об эволюции Земли, ее гео-, био- и ноосфер.

Нетрудно видеть, что все эти представления связаны с анализом и описанием глобальных процессов.

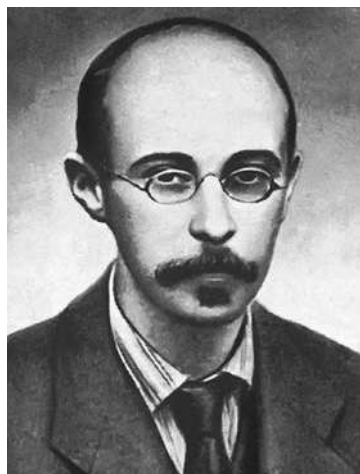
Остановимся кратко на содержании каждой из концепций.

1.2. Расширяющаяся Вселенная

Первым предсказал и описал математически космологическое расширение, которое теперь часто называют Большим взрывом, Александр Александрович Фридман (29.06.1888 — 16.09.1925). Он окончил в 1910 г. Петербургский университет и был оставлен при нем для подготовки к профессорскому званию. С 1920 г. Фридман — профессор Петроградского университета. Незадолго до смерти он стал директором Главной геофизической обсерватории. В книге (Черепашук, Чернин, 2003) описан эпизод, относящийся к этому периоду его жизни. «Будучи директором Главной физической (геофизической) обсерватории, он отвечал за прогноз погоды. Однажды он выходил быстрым шагом из здания Физико-технического института на Сосновке и на вопрос встречного знакомого, куда он так торопится, ответил на бегу: “В обсерваторию на Васильевский, пора выдавать прогноз погоды на завтра, а без меня они еще то напрогнозируют!” Прогноз погоды был тогда скорее изящным искусством, чем технологией, особенно когда идут атмосферные фронты».

Александр Александрович Фридман (4(16) июня 1888, Санкт-Петербург — 16 сентября 1925, Ленинград) — российский и советский математик и геофизик, создатель теории нестационарной Вселенной.

Родился 16 июня 1888 г. в Санкт-Петербурге. В школьные и студенческие годы увлекался астрономией. В 1906 г. вместе с одноклассником Яковом Тамаркиным опубликовал свою первую математическую работу в одном из ведущих научных журналов Германии «Математические анналы» («Mathematische Annalen»). В 1906 г. поступил на математическое отделение физико-математического факультета Петербургского университета, который окончил в 1910 г. Был оставлен на кафедре чистой и прикладной математики для подготовки к профессорскому званию. До весны 1913 г. Фридман занимался математикой — руководил практическими занятиями в Институте инженеров путей сообщения, читал



лекции в Горном институте. В 1913 г. поступил в Аэрологическую обсерваторию в Павловске под Петербургом и стал заниматься динамической метеорологией (теперь эту область науки называют геофизической гидродинамикой). Весной 1914 г. был направлен в командировку в Лейпциг, где в это время жил известный норвежский метеоролог Вильгельм Фриман Корен Бьеркнес (1862—1951), создатель теории фронтов в атмосфере. Летом того же года Фридман летал на дирижаблях, принимая участие в подготовке к наблюдению солнечного затмения в августе 1914.

С началом Первой мировой войны Фридман вступил добровольцем в авиационный отряд, участвовал в организации аэронавигационной и аэрологической службы на Северном и других фронтах. Фридман первым в России понял необходимость создания отечественного авиаприборостроения. В годы войны и разрухи он «пробил» эту идею и сам же её реализовал, став создателем и первым директором завода «Авиаприбор» в Москве (июнь 1917 г.).

В 1918—1920 гг. Фридман — профессор Пермского университета. С 1920 г. работал в Главной физической обсерватории, одновременно с 1920 г. преподавал в различных учебных заведениях Петрограда. Незадолго до смерти был назначен директором Главной геофизической обсерватории.

Основные работы Фридмана посвящены проблемам динамической метеорологии (теории атмосферных вихрей и порывистости ветра, теории разрывов непрерывности в атмосфере, атмосферной турбулентности), гидродинамике сжимаемой жидкости, физике атмосферы и релятивистской космологии. Фридман одним из первых освоил математический аппарат теории гравитации Эйнштейна и начал читать в университете курс тензорного исчисления как вводную часть к курсу общей теории относительности. В 1923 г. вышла в свет его книга «Мир как пространство и время» (переиздана в 1965), познакомившая широкую публику с новой физикой.

Фридман предсказал расширение Вселенной, первым проанализировав в 1922—1924 гг. нестационарные решения уравнений Эйнштейна при исследовании релятивистских моделей Вселенной, положив начало развитию теории нестационарной Вселенной.

Умер Фридман в Ленинграде от брюшного тифа 16 сентября 1925 г.

Основные научные работы Фридмана относятся к гидромеханике, теории тяготения и теоретической геофизике. Книгой «Опыт гидромеханики сжимаемой жидкости» (1922) он заложил основы теоретической метеорологии. А.А. Фридман и В.К. Фредерикс первые познакомили русских физиков с общей теорией относительности. В 1922—1923 гг. Александр Александрович нашел нестационарные решения гравитационного уравнения Эйнштейна, доказав возможность существования нестационарной расширяющейся Вселенной (это нашло отражение в статьях «О кривизне пространства» и «О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной пространства»).

Обратимся вновь к книге (Черепашук, Чернин, 2003).

«Самый грандиозный прогноз Фридмана оказался безошибочным: мир действительно расширяется. Масштаб этой фигуры был в ученом мире с самого начала очевиден. Но никто никогда не называл его “великим советским ученым”. Большая Советская энциклопедия глухо толковала о каких-то его идеологических заблуждениях. Через 12 лет после его смерти (да-да, в 1937 проклятом) на Фридмана было заведено дело № 555: его разоблачили как “главаря антисоветской банды ученых-саботажников”. Двое из его учеников были расстреляны...

В последние годы явление космологического расширения часто называют Большим взрывом. В ходу также и менее общее понимание этого термина: под ним иногда подразумевают первые, начальные стадии космологического расширения. А иной раз — и сам физический механизм (до сих пор не разгаданный), благодаря которому расширение началось. Мы будем здесь пользоваться термином в его самом широком смысле».

Последуем в смысле толкования термина за авторами цитированной книги (Черепашук, Чернин, 2003). В 1929 г. теория Фридмана была подтверждена Эдвином Хабблом, который обнаружил разбегание галактик.

Эдвин Пауэлл Хаббл (*Edwin Powell Hubble*, 20 ноября 1889, Маршфилде, штат Миссури — 28 сентября 1953, Сан-Марино, штат Калифорния) — знаменитый американский астроном. В 1914–1917 гг. работал в Йеркской обсерватории, с 1919 г. — в обсерватории Маунт-Вилсон. Член Национальной академии наук в Вашингтоне с 1927 г.

Основные труды Хаббла посвящены изучению галактик. В 1922 г. предложил подразделить наблюдаемые туманности на внегалактические (галактики) и галактические (газопылевые). В 1924–1926 гг. обнаружил на фотографиях некоторых ближайших галактик звёзды, из которых они состоят, чем доказал, что они представляют собой звёздные системы, подобные нашей Галактике. В 1929 г. обнаружил зависимость между красным смещением галактик и расстоянием до них (закон Хаббла). В честь Хаббла назван знаменитый космический телескоп «Хаббл», введенный на орбиту в 1990 г. и до сих пор активно эксплуатируемый астрономами всего мира.



Рассмотрим элементарную модель расширяющейся Вселенной, положив в ее основу так называемое расширение Хаббла, который экспериментально установил разбегание галактик со скоростью $\vec{v}$, пропорциональной расстоянию $\vec{r}$ до центра разбегания, т.е.

$$\vec{v} = H\vec{r}, \quad (1.1)$$

где H — постоянная Хаббла.

Заметим, что излагая таким образом модель, мы нарушим временную последовательность открытий: сначала Фридман теоретически предсказал космологическое расширение и формула (1.1) вытекала из его теории, а потом ее экспериментально установил Хаббл.

Кажется, что сообразно грандиозности задачи должна быть и очень сложная математика. На самом деле есть и простые модели.

Пусть мы имеем шар радиуса R , плотность вещества ρ в нем всюду одинаковая, а масса всего вещества, равномерно заполняющего шар, равна M . Допустим, что вещество шара — газ каких-то частиц. Важно, чтобы давление внутри шара было пренебрежимо мало. Тогда единственной силой, действующей на частицы газа, будет их взаимное притяжение, стремящееся сблизить частицы, что соответствовало бы сжатию шара. Однако допустим, шар расширяется благодаря тому, что в какой-то «начальный момент» всем частицам приданы скорости в соответствии с формулой (1.1), и они разлетаются от центра шара наружу. Рассмотрим некоторую частицу массы m на поверхности шара. Ее скорость будет равна

$$v_R = HR, \quad (1.2)$$

а кинетическая энергия

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv_R^2}{2}.$$

Сила притяжения, создаваемая всеми остальными частицами, направлена против этого движения и равна

$$F = -\gamma \frac{Mm}{R^2},$$

где γ — гравитационная постоянная (ньютоновская постоянная тяготения). Она стремится остановить движение частицы и сменить расширение на сжатие. Для потенциальной энергии нашей частицы можно приближенно написать:

$$E_{\text{пот}} \approx FR \approx -\gamma \frac{Mm}{R}.$$

Закон сохранения энергии можно записать в виде:

$$\frac{mv^2}{2} - \gamma \frac{Mm}{R} = \text{const} = C$$

или

$$v_R^2 = 2\gamma \frac{M}{R} + C_1, \quad (1.3)$$

где $C_1 = \frac{2C}{m}$. Легко видеть, что если в соотношении (1.3) $C_1 > 0$, то расширение будет продолжаться бесконечно, если $C_1 < 0$, то по достижению $R = \frac{2\gamma M}{C_1}$ расширение остановится и сменится сжатием. Граничной ситуации соответствует равенство

$$v_R^2 - 2\gamma \frac{M}{R} = 0. \quad (1.4)$$

Подставив в равенство (1.4) соотношение (1.2) и массу вещества с плотностью ρ , заполняющего шар, т.е. $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$, получаем:

$$R^2 \left(H^2 - \frac{8\pi}{3} \gamma \rho \right) = 0.$$

Откуда для плотности вещества в нашей модели Вселенной имеем

$$\rho = \frac{3H^2}{8\pi\gamma}. \quad (1.5)$$

Соотношение (1.5) в точности совпадает с оценкой, которую получил Фридман на основе общей теории относительности. Из равенства (1.4) следует, что

$$v_R = \sqrt{2\gamma \frac{M}{R}} \text{ или } \frac{dR}{dt} = \sqrt{2\gamma \frac{M}{R}}.$$

Разделяя переменные и интегрируя полученное от 0 до R и от 0 до t , находим:

$$\frac{2}{3} R^{3/2} = \sqrt{2\gamma M} \cdot t, \quad (1.7)$$

где t — время, прошедшее с начала космологического расширения. Учитывая, что $v_R = \sqrt{2\gamma} \frac{M}{R} = HR$, находим $\sqrt{2\gamma M} = HR^{3/2}$. Подставляя последнее соотношение в (1.7), получаем возраст Вселенной

$$t = \frac{2}{3H}.$$

Постоянная Хаббла $H = 65 \pm 10$ км/(с·Мпк) (Мпк — мегапарсек); парсек — расстояние, с которого диаметр земной орбиты виден под углом в одну секунду. Тогда

$$t \approx 10^{10} \text{ лет},$$

что является разумной величиной.

Из соотношения (1.7) легко оценить зависимость расстояний в мире от возраста Вселенной. Очевидно

$$R \sim t^{2/3}.$$

Если бы гравитации не было, то имел бы место инерциальный разлет частиц, т.е. $R \sim t$. Когда есть тяготение, расширение происходит медленнее, чем по инерции, т.е. оно замедляется со временем¹.

Естествен вопрос: «Что же расширяется?» Ответ на него находим в книгах (Черепашук, Чернин, 2003) и (Чернин, 2005).

Теория Фридмана описывает Вселенную как целое, поэтому и свойства ее как целого проявляются лишь в самых крупных масштабах, но доступных наблюдениям. Основная идея общей теории относительности состоит в том, что свойства пространства и времени определяются распределением и движением вещества, заполняющего пространство. Отсюда вывод: пространство, в котором вещество расширяется, и само должно расширяться, т.е. закон Фридмана расширения вещества — это одновременно и закон расширения самого мирового пространства. Обратимся вновь к книге (Черепашук, Чернин, 2003), в которой авторы пишут сле-

¹ Заметим, что проведенные выше оценки в книгах А.М. Черепашука и А.Д. Чернина получены из приближенного соотношения $\gamma\rho^3 \sim 1$, которое вытекает просто из соображений размерности (из γ и ρ можно составить единственную безразмерную комбинацию).

Как указано в этих книгах, по космологическим данным 2003 г., возраст мира находится в пределах от 13 до 15 млрд лет. Таким образом, полученная нами оценка в 10 млрд лет весьма удачна.

дующее. «Космологическое расширение определяется и управляется веществом посредством собственного тяготения вещества.

Иногда не вполне точно говорят, что все без исключения расстояния в мире увеличиваются из-за космологического расширения. Это не так. Ничто на Земле не меняет своих размеров, и она сама не расширяется по “космологической причине”. Не меняют из-за этого своих размеров ни планеты, ни звезды, ни галактики. На небольших расстояниях галактики могут и сближаться друг с другом».

Считается, что космологию создали три крупнейших наблюдательных открытия. Первое, о котором уже упоминалось, — разбегание галактик, которое теперь понимают как всеобщее расширение Вселенной (элементарная теория этого глобального явления приведена выше). Второе — регистрация реликтового излучения, которое равномерно заполняет все пространство мира (Арно Пензиас, Роберт Вилсон, 1965). Последнее открытие (1998—1999) — открытие космического вакуума двумя международными группами астрономов. Необходимо подчеркнуть, что все эти открытия были предсказаны теоретиками: 1922 г., А.А. Фридман — расширение Вселенной; 1940—50-е гг., Георгий Антонович Гамов — реликтовое излучение; 1917 г., Альберт Эйнштейн — космический вакуум (темная энергия) — самый загадочный феномен физики и космологии. Вновь воспользуемся книгой (Чернин, 2005).

«Наряду с темной энергией, во Вселенной присутствует еще и “темная материя”, называемая также скрытой массой. О ее существовании астрономы догадывались еще с середины 1930-х гг. благодаря главным образом усилиям Яана Эйнасто и его коллег по Тартуской обсерватории (Эстония). Эта невидимая материя не излучает света и проявляет себя только своим тяготением. Она образует обширное гало вокруг галактик, содержится в их группах и скоплениях. Во Вселенной ее по массе в 7—10 раз больше, чем светящегося вещества звезд.

Физическая природа темной материи почти столь же загадочна, как и природа темной энергии. Имеются, однако, основания предполагать, что темная материя — это скорее всего газ элементарных частиц, которые еще предстоит открыть в физическом эксперименте. Но в любом случае эти частицы наверняка не протоны, нейтроны или электроны, из которых состоит “обычное” вещество звезд».

Остановимся кратко на указанных открытиях, следуя работам (Черепашук, Чернин, 2003), (Чернин, 2005), (Тернер, 2009).

Реликтовое излучение было предсказано Георгием Антоновичем Гамовым (1904—1968), профессором Университета Джорджа Вашингтона в процессе построения теории «горячей» Вселенной. Гамов упоминал, что идею «горячей» Вселенной он заимствовал у своего учителя Фридмана, студентом которого он был в Ленинградском университете. Согласно этой теории наша Вселенная началась с горячего Большого взрыва, который произошел 10—15 млрд лет назад одновременно и повсюду в мире, заполнив все пространство горячим излучением и веществом. Из последнего через миллиарды лет образовались все астрономические тела и все, что существует на них. Вселенная эволюционировала от бесформенной смеси элементарных частиц к современному высокоструктурированному космосу. Гамов считал, что ранняя Вселенная была естественным ядерным реактором, и все химические элементы появились в результате синтеза при весьма умеренной плотности и необычайно высокой температуре. Сегодня можно считать доказанным, что распространенность в космосе двух главных элементов — водорода и гелия — может быть объяснена ядерными реакциями в горячем веществе Вселенной. Кислород, углерод, кремний и другие более тяжелые элементы, по-видимому, синтезировались иначе, возможно, при вспышках сверхновых звезд.

Георгий Антонович Гамов (также известен как Джордж Гамов) — (20 февраля (4 марта) 1904, Одесса — 19 августа 1968, Боулдер) — советский и американский физик-теоретик, астрофизик и популяризатор науки. В 1933 г. покинул СССР, в 1940 г. получил гражданство США. Член-корреспондент АН СССР (1932—1938 гг., восстановлен посмертно в 1990 г.). Член Национальной академии наук США (1953).



Гамов прославился своими работами по квантовой механике, атомной и ядерной физике, астрофизике, космологии, биологии. Он является автором первой количественной теории альфа-распада, одним из основоположников теории «горячей Вселенной» и одним из пионеров применения ядерной физики к вопросам эволюции звезд. Он впервые четко сформулировал проблему генетического кода. Широкую известность Гамову принесли его научно-популярные произведения, в которых живым и доступным языком рассказывается

о современных научных представлениях, а также его автобиографическая книга «Моя мировая линия». Биографический очерк о Г.А. Гамове представлен в книге (Френкель, Чернин, 2013).

Еще одним продуктом ранней горячей Вселенной был газ квантов электромагнитного излучения — квазичастиц, носящих название фотонов, имеющих нулевую массу покоя и распространяющихся в пространстве со скоростью света 300 000 км/с. Фотоны, которые существовали в эпоху ядерных реакций, сохранились и до наших дней, как и предсказывала теория Гамова. Более того, Гамов и его ученики показали, что в современную эпоху температура фотонов должна лежать в пределах от 1 до 10 градусов Кельвина. Эти холодные фотоны должны равномерно заполнять все пространство, создавая общий космический фон электромагнитного излучения, лежащего в микроволновом диапазоне. Экспериментально измеренная температура реликтового излучения оказалась близкой к 3 градусам Кельвина, т.е. теория горячей Вселенной получила прямое наблюдательное подтверждение в исследованиях 1965 г. радиоастрономов А. Пензиаса и Р. Вилсона. В книге (Чернин, 2005) приводится любопытный факт. «За семь лет до Пензиаса и Вилсона трехградусное космическое излучение реально регистрировалось в Пулковской обсерватории с помощью рупорной антенны, построенной С.Э. Хайкиным, Н.Л. Кайдановским и Т.А. Шмаоновым. Но никто, увы, не придал тогда этому значения... Удивительный космический феномен — остаточное излучение ранней горячей Вселенной — получил, по предложению Шкловского, название реликтового излучения. В англоязычной литературе чаще говорят “космическое микроволновое фоновое излучение”».

Как уже указывалось, в 1998—1999 гг. две большие группы астрономов (всего в работе участвовало около 100 человек) открыли всемирное антитяготение и космический вакуум, который часто называют темной энергией. Из открытия следует, что в наблюдаемой Вселенной доминирует вакуум, что соответствует гипотезе Эйнштейна, связанной с модификацией уравнений общей теории относительности.

При попытке применить общую теорию относительности для описания всего мира как целого Эйнштейн исходил из вечности и неизменности Вселенной (о разбегании галактик еще не было известно). К удивлению Эйнштейна, теория не позволяла Все-

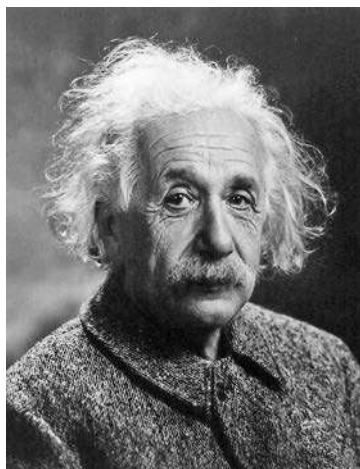
ленной быть статической. Что делать? Эйнштейн отвечает на этот вопрос так (цит. по: Чернин, 2005): «Я пришел к убеждению, что уравнения гравитационного поля, которых я до сих пор придерживался, нуждаются еще в некоторой модификации...» И далее: «...необходимо некоторое обобщение уравнений гравитационного поля». Обобщение состояло во введении в общую теорию относительности новой космологической константы Λ . Результат поразительный: Вселенная стала вечной, находящейся в покое и без развития. Ее трехмерное пространство неэвклидово и подобно сфере (гиперсфера). Вселенная Эйнштейна идеально симметрична во времени и пространстве. Теория Фридмана и особенно экспериментальное открытие Хабблом космологического расширения делали космологическую константу ненужной. Еще раз процитируем книгу (Чернин, 2005).

«Случалось, Эйнштейн называл гипотезу о космологической постоянной самым большим своим промахом в науке... В публичных высказываниях Эйнштейна тон был иным. Он говорил, что в конечном счете, все должен решить эксперимент. В 1934 г. он писал: "...при рассмотрении космологической проблемы представляется естественным отказаться пока от введения космологической постоянной, — до тех пор, пока для ее введения не возникнут опытные основания". Теперь они появились. И самое главное: статичность мира находится в полном согласии с существованием космологического расширения.

Стало ясно лишь постепенно, что в своей космологической работе Эйнштейн предложил гипотезу о том, что наряду с обычным веществом, все частицы которого — протоны, электроны, нейтроны и т.п. — испытывают взаимное притяжение, в мире существует и совсем необычная среда, создающая не притяжение, а антипритяжение, отталкивание. Эта неизвестная до того — ни в теории, ни в эксперименте — среда действует на обычное вещество Вселенной и способна уменьшить или даже вовсе компенсировать взаимное притяжение его частиц, а то и пересилить его.

Антигравитирующая среда представлена в модифицированных уравнениях всего одной константой — эйнштейновской космологической постоянной Λ . Величина космологической постоянной не выводится из какой-либо фундаментальной теории, а подлежит наблюдательному определению. В модели Эйнштейна ее значение должно быть таким, чтобы обеспечить точную компенсацию тяготения антитяготением».

Альберт Эйнштейн (14.03.1879 г., Ульме (Вюртемберг, Германия) — 18.04.1955 г., Принстон, США) — физик-теоретик, один из основоположников современной физики. Известен прежде всего как автор теории относительности. Эйнштейн внес также значительный вклад в создание квантовой механики, развитие статистической физики и космологии. Лауреат Нобелевской премии по физике 1921 г. («За объяснение фотоэлектрического эффекта»). А. Эйнштейн первым выдвинул идею, что гравитация есть искажение пространства-времени, чем объясняется множество физических явлений. На теориях Эйнштейна во многом строится современная картина мира.



Личность Эйнштейна с момента публикации в 1905 г. специальной теории относительности привлекала большое общественное внимание. Его антивоенные выступления, призывы к различным социальным реформам, симпатии к идеям коммунизма и сионизма вызвали агрессивную реакцию нацистской партии, неоднократно угрожавшей Эйнштейну физической расправой. Завистники торжествовали, когда после прихода фашистов к власти в 1933 г. самый известный физик страны навсегда эмигрировал в США.

2 августа 1939 г. Эйнштейн подписал письмо на имя президента США Франклина Делано Рузвельта о необходимости создания ядерного оружия, чтобы опередить разработки ученых фашистской Германии в этой области. Не участвуя непосредственно в создании атомной бомбы, Эйнштейн помог убедить правительство Соединенных Штатов в ее необходимости, о чем потом горько сожалел.

Из-за указанной компенсации все частицы в мире могут находиться в покое, и Вселенная как целое неподвижна и статична, т.е. не меняется со временем. Удивительно, но это так; из-за введения, причем, вынужденного новой космологической постоянной появилась грандиозная гипотеза всемирного антитяготения. В настоящее время считается, что космологическая постоянная Λ есть количественная характеристика космического вакуума (Глинер, 1965). Что же такое космический вакуум? Ему соответствует такое состояние космической среды, в котором она обладает постоянной во времени и всюду одинаковой в пространстве плотностью в любой системе отсчета, причем по плотности энергии вакуум превосходит все другие («обычные») формы вещества, вместе взятые. Именно космологический вакуум создает космическое антитяготение, антигравитацию. Последняя управляет динамикой космологического расширения в современную эпоху.

Действительно, всемирное антитяготение стремится удалить тела друг от друга. Само антитяготение связано с тем, что если плотность вакуума положительна, то его давление отрицательно, а тогда и гравитирующая энергия тоже отрицательна.

Галактики удаляются друг от друга, как показывают наблюдаемые скорости разбегания. Сила антигравитации, будучи направлена вдоль скорости, увеличивает скорости галактик, помогая им разбегаться. Таким образом, благодаря тому, что расширение происходит с ускорением, оно будет продолжаться неограниченно. При этом средняя плотность вещества и излучения будет только убывать, и, следовательно, тяготение никогда не будет преобладать во Вселенной, и будет иметь место только неограниченное расширение.

Согласно (Черепашук, Чернин, 2003), эволюция Вселенной протекала так. «В ранней Вселенной безраздельно господствовало всемирное тяготение невакуумных компонент космической среды. А эпоха антитяготения наступила только при возрасте мира в 6—8 миллиардов лет: в этот момент плотность темного вещества упала до значения плотности вакуума... Итак, можно сказать, что в первую половину своей жизни Вселенная замедлялась, а во вторую ускорялась.

В будущем ее ждет дальнейшее ускоренное расширение, которое никогда не окончится».

Вселенная Фридмана — нестатическая, подвижная, развивающаяся во времени. Что же с ней происходит с началом доминирования вакуума? Предположим, что влиянием всего невакуумного вещества можно пренебречь. Тогда только вакуум, плотность которого не меняется со временем и давление которого, равное произведению плотности на квадрат скорости света со знаком минус, также не меняется во времени, будет определять свойства пространства — времени. Но в этом случае с вакуумом ничего не происходит, он неизменен везде и всюду. Следовательно, Вселенная, где царствует вакуум, — статическая, не меняющаяся во времени. Но тогда получается, что из Вселенной Фридмана исчезла эволюция, хотя галактики в нем продолжают разбегаться. Ответ на видимое противоречие в следующем (Черепашук, Чернин, 2003).

«Да, галактики удаляются друг от друга в мире вакуума и при том с все возрастающими скоростями. Но чем быстрее они разбегаются, тем меньше плотность их распределения и, значит, тем слабее их влияние — через их собственное тяготение — на свойства пространства — времени. А влияние вакуума — через его антитяготение — становится тем временем все более и более безраздельным.

В итоге галактики, да и вообще всё невакуумное вещество, оказываются в мире, свойства которого определяются не ими, а вакуумом. Так эволюция мира в целом затухает, его пространственно-временной каркас застывает и остается таким «замороженным» навсегда»¹.

Кто же все-таки прав? Эйнштейн с идеей неизменной и вечной Вселенной или Фридман с идеей нестационарной Вселенной? Правы оба, но каждый по-своему. Идея Эйнштейна реализуется не в статической модели, а в идеально симметричной модели де Ситтера, в то время как идея нестационарной Вселенной Фридмана — в наблюдаемом феномене хаббловского разбегания галактик и в общей теории эволюции Вселенной. Можно согласиться с авторами (Черепашук, Чернин, 2003), которые считают, что «в некотором смысле идея Фридмана включает в себя, в частности, и идею статичности Эйнштейна — в качестве предельного случая вакуумного мира».

Остановимся кратко на гипотезе Глинера и связанном с ней процессе инфляции. Гипотеза, выдвинутая в 1965 г. Э.Б. Глинером, состоит в том, что начальным состоянием всего вещества Вселенной был вакуум, не тот, о котором написано выше, а некий первичный вакуум. Плотность его была во много раз больше плотности наблюдаемого в современном состоянии мира. По Глинеру, первичный вакуум вызывает разлет вещества, порождая тем самым космическое расширение. Гипотеза относится к первым мгновениям (много меньше нескольких минут) космологического расширения. Однако до сих пор непонятно, откуда берется вещество в начальном состоянии Вселенной и куда потом девается вакуум.

Сначала гипотезу Глинера не приняли, а потом стали активно развивать, и появилось новое направление в теоретической

¹ Еще до решений Фридмана в 1917 г. де Ситтер исследовал модель, в которой нет вещества, а вакуум представлен эйнштейновской космологической постоянной. Очевидно, что данная модель — частный случай теории Фридмана, когда во Вселенной отсутствуют невакуумные формы материи. Описываемое моделью де Ситтера пространство-время статично, а потому его мир вечен, неизменен и идеально симметричен по своим геометрическим свойствам. В этом смысле он похож на статический мир Эйнштейна, в котором покой достигался равновесием тяготения вещества и антитяготения вакуума. У де Ситтера антитяготение ничем не уравновешено, но его мир находится в покое. Следовательно, для вакуума равновесие сил не обязательно: неизменный вакуум делает неизменным и мир в отсутствие других сил.

космологии, получившее название «инфляция» или раздувание — процесс первоначального ускоренного расширения Вселенной под действием антигравитации вакуума. Появился даже термин «раздувающаяся Вселенная». Иногда приводят цифры: инфляционная фаза — стадия ускоренного расширения — продолжалась 10^{-36} секунды; за это время диаметр Вселенной увеличился в 10^{50} раз, тогда как в начале процесса размер областей пространства, рассматриваемый в таких моделях, составлял не более 10^{-33} сантиметров.

В современных моделях инфляции первичный вакуум с самого начала имеет разную плотность в разных точках пространства, причем распределение этой плотности хаотически неоднородное, и там, где плотность слишком мала, инфляция не начинается. Но там, где плотность велика, раздувание идет быстро, и, как пишет А.Д. Линде — автор модели хаотической инфляции, в мире возникают «острова в океане хаоса». Причем размер каждого такого острова много больше размеров реально наблюдаемого мира. А.Д. Линде пишет, что изменился «взгляд на Вселенную как на нечто однородное и изотропное и сформировалось новое видение Вселенной как состоящей из многих локально однородных и изотропных мини-вселенных, в которых и свойства элементарных частиц, и величина энергии вакуума, и размерность пространства — времени могут быть различными».

Теория развивающейся Вселенной радикально изменяет наше представление о мире: наша Вселенная может быть не единственной и неповторимой, а одной из многих. Главное сомнение в том, не выходит ли модель множественных Вселенных за рамки физики, поскольку физика и наблюдательная астрономия способны изучать область размером в 10 млрд световых лет.

Можно легко понять и разделить энтузиазм авторов (Черепашук, Чернин, 2003), которые пишут следующее.

«И все же исключительно увлекательна сама по себе идея множественных миров! Она не поможет раздвинуть горизонт реальных наблюдений, не пополнит запас конкретных знаний о Вселенной. Но она, несомненно, расширяет круг наших общих воззрений на возможное устройство мира. Вернее, не мира, а мультимира, как называют всю совокупность многих и многих Вселенных. Удивительно и волнующе это вечное существование кипящего вакуума, самопроизвольно порождающего новые и новые Вселенные в процессе, которому не было начала и не будет конца».

Закончим данный раздел космической временной шкалой весьма надежно установленных событий вплоть до нашей эры, используя статью (Тернер, 2009).

Временная шкала надежно установленных событий рождения и эволюции Вселенной

<i>Первые мгновения Большого взрыва</i>	
10^{-35} сек.	Космическая инфляция порождает огромную область пространства, заполненную комковатым кварковым супом (кварки — элементарные частицы с дробным зарядом; из них, по современным представлениям, состоят все сильновзаимодействующие внутриядерные частицы)
<i>Первые мгновения Большого взрыва</i>	
10^{-30} сек.	Синтезируется один из возможных типов темной материи — аксионы. Аксион — сверхлегкая «холодная» частица с массой примерно в 10^{26} раз меньше, чем у электрона. В очень сильном магнитном поле он может превратиться в фотон. «Холодным» аксион называют потому, что несмотря на рождение при очень высокой температуре, он движется медленно. Поэтому аксионы легко группируются в галактики
<i>Первые мгновения Большого взрыва</i>	
10^{-11} сек.	Вещество берет верх над антивеществом. Переход от первых мгновений Большого взрыва к формированию атомов
10^{-10} сек.	Синтезируется второй возможный тип темной материи — нейтралино. Нейтралино — легчайшая из частиц недавно предсказанного класса массивных копий известных частиц. Оно должно иметь массу от 100 до 1000 масс протона и может рождаться в экспериментах на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН вблизи Женевы
<i>Формирование атомов</i>	
10^{-5} сек.	Из кварков формируются протоны и нейтроны
<i>Формирование атомов</i>	
0,01—300 сек.	Из протонов и нейтронов формируются ядра гелия, лития и тяжелого изотопа водорода (дейтерия)
<i>Переход от формирования атомов к темной эре</i>	
380 тыс. лет	Из ядер и электронов формируются атомы, освобождая реликтовое (космическое микроволновое излучение)

<i>Темная эра</i>	
380 тыс. лет — 300 млн лет	Гравитация продолжает увеличивать перепады плотности в газе, заполняющем пространство
<i>Переход от темной эры к современной эре</i>	
300 млн лет	Формируются первые звезды и галактики
<i>Современная эра</i>	
1 млрд лет	Предел нынешних наблюдений (объекты с наибольшим красным смещением)
3 млрд лет	Формируются скопления галактик; максимум частоты рождения звезд
9 млрд лет	Рождение Солнечной системы
10 млрд лет	Темная энергия пересиливает гравитацию, и расширение начинает ускоряться

Поскольку книга рассчитана в первую очередь на гуманитариев, в качестве дополнительной литературы к разделам 1.1 и 1.2 можно порекомендовать ряд статей из журнала «В мире науки» (ВМН):

Лоеб А. Темные века Вселенной // ВМН. 2007. № 3.

Райордэн М., Зэйц У. Первые микросекунды // ВМН. 2006. № 8.

Буссо Р., Полчински Й. Ландшафт теории струн // ВМН. 2004. № 12.

Венециано Г. Миф о начале времен // ВМН. 2004. № 8.

Кросс Л., Тернер М. Космическая загадка // ВМН. 2004. № 12.

Клифтон Т., Ферейра П. Действительно ли существует темная энергия? // ВМН. 2009. № 6.

Кросс Л., Шеррер Р. Наступит ли конец космологии // ВМН. 2008. № 6.

ВМН. 2009. № 4. Спецвыпуск: Эволюция продолжается (к разделу 1.1).

Боджовальд М. В поиске за скачущей Вселенной // ВМН. 2009. № 1.

Тем, кто интересуется философскими аспектами новой научной картины мира, включающей, в частности, открытие темной материи, мы рекомендуем статью (Урсул, 2009) и книгу (Ильин, Урсул, 2012). В них выявляется влияние этого открытия на фундаментальные философские категории — движение, пространство, время, информацию, развитие и др., предлагается новая концепция универсальной эволюции на основе принципа самосохранения материи и инновационного эволюционизма.

1.3. Нелинейная наука, синергетика и теория самоорганизации

Для описания глобальных эволюционных процессов необходим соответствующий научный аппарат. Центральный блок в формировании новой научной картины мира составляет нелинейная наука (часто используют термины «синергетика», «нелинейная динамика», «наука о сложности») с акцентом на теорию самоорганизации¹.

Президент Международного союза теоретической и прикладной механики Дж. Лайтхилл писал в извинительном тоне следующее (Lighthill, 1986).

«Мы хорошо сознаем сегодня, что энтузиазм, испытываемый нашими предшественниками благодаря блестящим достижениям ньютоновской механики, привел нас к обобщениям в области предсказуемости, которые, как мы знаем, в дальнейшем оказались ложными. Мы хотим все вместе принести наши извинения за то, что мы ввели в заблуждение образованную публику, ибо опирались на такие идеи по поводу детерминизма систем, удовлетворяющих ньютоновским законам движения, которые показали после 1960 года свою несостоятельность».

За что же извинялся Лайтхилл?

¹ Так, например, книга Элвина Скотта, в которой описываются основные модели нелинейной науки, их свойства и методы их исследования, носит название «Нелинейная наука: рождение и развитие когерентных структур» (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007). По сути дела, объясняя название книги, автор пишет следующее: «Известно, что в случае рассмотрения нелинейных систем целое есть нечто большее, нежели простая совокупность его частей, и проявляется в образовании новых структур, которые оказываются пространственно или временно когерентными». Одно из определений когерентных структур (КС), например, в турбулентных течениях, гласит: КС в турбулентных течениях называют долгоживущие упорядоченные крупномасштабные образования на фоне мелкомасштабной турбулентности для данного типа течения. Проблема возникновения и самоподдержания КС является общей для гидродинамики, физики плазмы, экологии, биофизики и т.д. (см. книгу Э.Скотта, в которой он относит к КС кольцевые и спиральные волны, нервные импульсы, солитоны и др.). «Понимание этого факта стало переломным моментом в истории науки и привело к изменению наших представлений о внутренней организации научных знаний. Эти новые структуры представляют собой очень большие сущности, обладающие своими уникальными свойствами, характеризующиеся определенными временами существования и вступающие в специфические взаимодействия друг с другом. Поскольку эти взаимодействия также являются нелинейными, новая динамика индуцирует на более высоком уровне описания другие структуры» (Э. Скотт. С. 14).

Нет нужды доказывать, что главная сила науки состоит в возможности предсказывать. Например, затмения можно предсказывать на сотни лет вперед на основе законов гравитации. Однако почему-то нельзя точно предсказать погоду, хотя атмосферные течения подчиняются физическим законам столь же строго. Нельзя точно предсказать течение горного ручья и траекторию шара в бильярде. В чем же дело? Почему в указанных явлениях теряется четкая связь между причиной и следствием? Ведь до последнего времени считалось, что точной предсказуемости, например, погоды, можно добиться: нужно собрать и обработать побольше информации.

Господствовали представления Лапласа, который еще в 1776 г. написал так (цит. по: Крайтчфилд, 1987): «Состояние системы природы в настоящем есть, очевидно, следствие того, каким оно было в предыдущий момент, и если мы представим себе разум, который в данное мгновение постиг все связи между объектами Вселенной, то он сможет установить соответствующие положения, движения и общее воздействие всех этих объектов в любое время в прошлом и будущем.

Физическая астрономия, область знания, которая делает величайшую честь человеческому уму, дает нам представление, хотя и не полное, чем был бы такой разум. Простота законов, по которым движутся небесные тела, и соотношения между их массами и расстояниями позволяют проанализировать их движение до определенной точки, и чтобы определить состояние системы этих крупных тел в прошлых или будущих веках, математику достаточно того, чтобы их положения и скорость были получены из наблюдений в любой момент времени. Человек обязан этим мощности приборов, которыми он пользуется, и небольшому числу соотношений, которые он применяет в своих расчетах. Однако незнание различных причин, вызывающих те или иные события, а также их сложность в сочетании с несовершенством анализа мешает нам достичь той же уверенности по отношению к огромному большинству явлений.

Таким образом, существуют вещи, которые для нас неопределенны, вещи более или менее вероятные, и мы стараемся компенсировать невозможность их узнать, определяя различные степени их достоверности. Получается, что слабости человеческого разума мы обязаны появлением одной из самых тонких и искусных математических теорий — науке о случае, или о вероятности».

Пьер-Симон Лаплас (23 марта 1749 — 5 марта 1827) — французский математик и астроном, известен работами в области небесной механики, дифференциальных уравнений, один из создателей теории вероятностей. Родился в крестьянской семье в Бомон-ан-Ож, в нормандском департаменте Кальвадос. Учился в школе бенедиктинцев, из которой вышел, однако, убеждённым атеистом. Состоятельные соседи помогли способному мальчику поступить в университет города Кан (Нормандия). Посланный им в Турин и напечатанный там мемуар «*Sur le calcul intégral aux différences infiniment petites et aux différences finies*» (1766) обратил на себя внимание учёных, и Лаплас был приглашён в Париж. Там он послал Даламберу мемуар об общих принципах механики. Тот сразу оценил юношу и помог устроиться преподавателем математики в Военную академию.



В 1773 г., применив математический анализ, Лаплас доказал, что орбиты планет устойчивы, и их среднее расстояние от Солнца не меняется от взаимного влияния (хотя испытывает периодические колебания). Даже Ньютон и Эйлер не были в этом уверены. За эту работу 24-летний Лаплас был избран членом (адъюнктом) Парижской Академии наук. В 1785 г. Лаплас становится действительным членом Парижской Академии наук. В этом же году, на одном из экзаменов, Лаплас высоко оценивает знания 17-летнего абитуриента Бонапарта. Впоследствии их отношения были неизменно тёплыми.

В революционные годы Лаплас принял руководящее участие в работах комиссии по введению метрической системы, возглавлял Бюро долгот (так назывался французский Астрономический институт) и читал лекции в Нормальной школе. На всех этапах бурной политической жизни тогдашней Франции Лаплас никогда не вступал в конфликты с властями, которые почти неизменно осыпали его почестями. Простонародное происхождение Лапласа не только предохранило его от репрессий революции, но и позволило занимать высокие должности, хотя никаких политических принципов у него не было (впрочем, возможно, именно поэтому).

В 1799 г. вышли первые два тома главного труда Лапласа — классической «Небесной механики» (кстати, именно Лаплас ввёл этот термин). В монографии рассматриваются движение планет, их формы вращения, приливы. Работа над монографией продолжалась 26 лет: том III вышел в 1802 г., том IV — в 1805, том V — в 1823—1825 гг. Стиль изложения был излишне сжатым, множество выкладок автор заменял словами «легко видеть, что...». Однако глубина анализа и богатство содержания сделали этот труд настольной книгой астрономов XIX века.

В «Небесной механике» Лаплас подвел итоги как собственным исследованиям в этой области, так и трудам своих предшественников начиная с Ньютона. Он дал всесторонний анализ известных движений тел Солнечной системы на основе закона всемирного тяготения и доказал её устойчивость в смысле практической неизменности средних расстояний планет от Солнца и незначительности колебаний остальных элементов их орбит. Наряду с массой специальных результатов, касающихся движений отдельных планет, спутников и комет, фигуры планет,

теории приливов и т. д., важнейшее значение имело общее заключение, опровергавшее мнение (которое разделял и Ньютон), что поддержание настоящего вида Солнечной системы требует вмешательства каких-то посторонних сверхъестественных сил.

В 1812 г. из-под его пера выходит «Аналитическая теория вероятностей», в которой Лаплас также подытожил все свои и чужие результаты.

Умер Лаплас 5 марта 1827 г. в собственном имении под Парижем, на 78-м году жизни.

Пьер Симон Лаплас считал, что законы природы подразумевают полную предсказуемость и строгий детерминизм, а случайность — порождение несовершенства наблюдений. И более 100 лет казалось, что в принципе он прав. Применение лапласовского детерминизма к социальным явлениям привело к известному философскому выводу об отсутствии свободной воли людей, о предопределенности их поведения. Считалось, что единичное человеческое усилие не может оказать существенного влияния на ход истории, что деятельность отдельного человека не влияет на социальные процессы. Развитие могло быть только поступательным, без каких-либо альтернатив. Более того, считалось, что пройденное представляет лишь исторический интерес, а возвраты к старому имеют новую основу. Что касается альтернатив, то они лишь случайные отклонения от главного пути и подчинены ему. Они сливаются и поглощаются главным течением событий.

Случайность тщательно изгонялась из научных теорий. Вспомним знаменитую телевизионную передачу С.П. Капицы «Очевидное-невероятное», эпиграфом к которой выбраны известные пушкинские строки:

О, сколько нам открытий чудных
Готовят просвещения дух
И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг,
И случай, Бог изобретатель.

Последняя строчка появилась в телевизионных титрах сравнительно недавно.

Картина мира, рисуемая классическим разумом, представляла его жестко обусловленным причинно-следственными связями, не зависящим ни от малых воздействий на нижележащих уровнях бытия, ни от малых воздействий космоса. Причем, причинные цели имеют линейный характер, а следствие если не тождественно причине, то по крайней мере пропорционально ей. По причинным цепям ход развития истории может быть рассчитан неограничен-

но в прошлое и будущее. Эволюция ретросказуема и предсказуема. Настоящее определяется прошлым, а будущее — настоящим и прошлым. Традиционным подходом к управлению сложными системами считалась цепочка «управляющее воздействие — желаемый результат» с подтекстом «чем больше вкладываешь энергии, тем больше будто бы и отдача». Хотя уже было известно, что многие усилия «уходят в песок» или даже приносят вред, если они противоречат собственному направлению самоорганизации сложных систем.

Дополнительным обоснованием главенства линейных представлений был доведенный до высокой степени совершенства линейный математический аппарат, который был частью математической культуры, в первую очередь физиков. Один из классиков современной нелинейной науки академик А.А. Андронов, говоря о линейном мире, где господствует принцип суперпозиции¹, восклицал: «Это дико частный случай! Наш мир нелинеен, наш мир — мир нелинейных систем».

В замечательном эссе «Нелинейность» (Данилов, 2008) известного математика и физика, переводчика, писателя и популяризатора науки Юлия Александровича Данилова есть объяснение некогда прохладного отношения к нелинейности (мы вернемся к его эссе в главе 6): «Во мнении, что именно линейная теория дает главный член бесконечного ряда приближения к истине, а нелинейности отводится скромная роль косметики на прекрасном лице линейной теории, вместилища всевозможных поправок, не меняющих сколь-нибудь существенно выводов линейной теории, физиков прошлого укрепляли блестящие успехи линейной теории и в первую очередь ее высочайшее достижение — электродинамика Максвелла.

Отпечаток распространенного некогда заблуждения относительно якобы главенствующей роли линейности в окружающем нас мире несет на себе сам термин “нелинейность”: его создатели сочли первичной линейность, а нелинейность восприняли как нечто вторичное, производное от линейности, и определили через ее отрицание. Современный физик, доведись ему заново создавать определение столь важной сущности, как нелинейность, скорее всего поступил бы иначе и, отдав предпочтение нелинейности как

¹ Применительно, например, к теории колебаний принцип суперпозиции гласит: если тело совершает несколько колебаний, то эти колебания складываются независимо друг от друга, т.е. не влияя друг на друга.

более важной и распространенной из двух противоположностей, определил бы линейность, как “не нелинейность”».

Свойства нелинейных систем зависят от их состояния.

Математическое поведение нелинейных систем описывается нелинейными уравнениями, содержащими изучаемые величины в степенях больше единицы или коэффициенты, зависящие от этих величин. По И.Р. Пригожину, одному из создателей науки о сложном, в дифференциальном уравнении, описывающем эволюцию системы, меняется некоторый управляющий параметр. При определенном значении параметра возникают по крайней мере два пути эволюции системы, что соответствует бифуркации — переходу в новый динамический режим, в другой мир (бифуркация от лат. *bi* — двойной и *furca* — развилка, т.е. означает развилку или раздвоение) (Ласло, 1995; Пригожин, 2002).



Илья Романович Пригожин (1917–2003) — бельгийский физик и лауреат Нобелевской премии по химии за работы по неравновесной термодинамике, диссипативным структурам и сложным системам. Родился 25 января 1917 г. в Москве. В 1921 г. семья эмигрировала из России в Западную Европу. В 1942 г. Илья Пригожин окончил брюссельский университет (Université Libre de Bruxelles).

С начала 1960-х гг. Пригожин жил и работал в городе Остин (штат Техас), где в 1967 г. основал Центр по изучению сложных квантовых систем (Center for Complex Quantum Systems), которым руководил до конца жизни. В Московском государственном университете создан и успешно функционирует Институт сложных систем имени И.Р. Пригожина.

Наука о сложном поведении нелинейных систем, об эволюции их во времени и пространстве, о колебаниях и волнах в них, развитии разного рода неустойчивостей и их стабилизации, возникновении хаоса и рождении структур и называется нелинейной наукой (иногда говорят о нелинейной динамике, синергетике или науке о сложности). Главное в нелинейной науке — нелинейная теория колебаний и волн.

Нелинейные эффекты описываются нелинейными функциями, позволяющими описывать колебания, резонансные выбросы, на-

существование и т.п. Линейные же функции «умеют» либо расти, либо убывать: одинаковому приращению аргумента линейной функции соответствует одинаковое приращение самой функции.

Нелинейная функция ведет себя иначе: одному и тому же приращению аргумента может соответствовать разное поведение функции. Отсюда и различие двух миров — линейного и нелинейного. Что значит нелинейность для естествознания, очень образно описал Ю.А. Данилов (Данилов, 2008). «В какой бы области естествознания ни возникала нелинейность явлений, она глубоко функциональна. В физике нелинейность — это учет различного рода взаимодействий, обратных влияний и тонких эффектов, ускользающих от более грубых сетей линейной теории. В химии нелинейность отражает обратные связи в сокровеннейших механизмах реакций. В биологии нелинейность исполнена высокого эволюционного смысла: только сильная нелинейность позволяет биологическим системам “...услышать шорох подползающей змеи и не ослепнуть при вспышке близкой молнии. Те биологические системы, которые не смогли охватить диапазон жизненнозначимых объектов среды, попросту вымерли, не выдержав борьбы за существование. На их могилах можно было бы написать: “Они были слишком линейными для этого мира” (А.М. Молчанов)».

Понимание того, что мир нелинеен, привело к разрушению многих традиционных, незыблемых представлений (см., например, Князева, Курдюмов, 1992).

Коснемся лишь некоторых аспектов нового взгляда на мир с позиций нелинейной науки.

1. Говоря о бифуркациях, мы уже упоминали, что для сложных систем существует несколько альтернативных путей развития. Как писал Александр Кушнер,

Не отодвинуть нам Линкольна или Гранта,
Но будущее многовариантно.
Предсказывать его, где взять талант.
На что мой друг сказал мне очень круто,
Что Клио выбирает почему-то
Из многих наихудший вариант.

И если раньше считалось (мы уже упоминали об этом), что существуют исторические закономерности, которые определяют такой глобальный процесс, как ход истории только в одном наперед известном направлении, то стало ясно — исторический процесс включает альтернативы и варианты, представляющиеся, например, в виде политических платформ.

В точках бифуркации, т.е. на определенных стадиях эволюции, возникает некоторая предопределенность развития процессов. Причем настоящее состояние системы определяется не только ее прошлым, ее историей, но начинает формироваться из будущего в соответствии с предполагаемым состоянием.

Обычно нелинейную науку связывают с естествознанием, но это неверно.

По-видимому, для гуманитария, который к тому же собирается изучать глобальные процессы, не менее важно овладеть понятиями современной картины мира, чем, скажем, для физика. Один из выдающихся людей нашего времени Ю.М. Лотман, наверное, первым из гуманитариев грамотно использовал термин «бифуркация» в своей работе «Клио на распутье» (Лотман, 1992), ссылаясь на определение И.Р. Пригожина (Пригожин, 2003). Он пишет, что в истории «...противоборствуют механизмы возрастания энтропии и, следовательно, растущего ограничения выбора, сведения альтернативных ситуаций к информационному нулю, с одной стороны, и постоянного увеличения перекрестков, альтернатив, моментов выбора пути, моментов, когда нельзя предсказать дальнейшее развитие — с другой. Здесь вступает в действие интеллект и личность человека, осуществляющего выбор. Это “минуты роковые”, по Тютчеву, или момент бифуркации, по Пригожину... История — не однолинейный процесс, а многофакторный поток. Когда достигается точка бифуркации, движение как бы останавливается в раздумье над выбором пути... В этот момент в историческом процессе в действие вступают интеллектуальные способности человека, дающие ему возможность осуществлять выбор». Обратите внимание на полную корреляцию сказанного с приведенным четверостишием А. Кушнера.

2. И все же главным открытием нелинейной науки было открытие детерминированного хаоса (не правда ли, существительное и определяющее его прилагательное, казалось бы, противоречат друг другу). За точкой бифуркации система может демонстрировать хаотическое поведение, подчиняющееся вполне определенным законам. В хаосе есть порядок!

Согласно Борису Слуцкому,

В этом хаосе есть закон.
Есть порядок в этом борделе.
В самом деле, на самом деле
Он действительно нам знаком.

Самое удивительное в том, что при определенных условиях движения очень простых систем становятся не только похожими, но и не отличимыми от случайного. Как объяснить это?

Объяснений несколько, остановимся на так называемом алгоритмическом подходе в теории динамических систем. Перенесемся в фазовое пространство — обычное пространство координат и пространство скоростей (или импульсов) системы.

Если теперь мы поместим в фазовое пространство динамическую систему (даже очень простую), то ее роль состоит в превращении случайности начальных условий в макроскопическую случайность движения системы. При существовании в системе так называемой локальной неустойчивости, когда близкие траектории расходятся, на каком-то этапе движение определяется деталями начальных условий и сильно зависит от них. Предположим, что фазовое пространство ограничено. Тогда рано или поздно разбежавшиеся траектории вернутся друг к другу. И так будет много раз. Происходит как бы перемешивание фазового пространства, проявляющееся в хаотическом движении фазовых траекторий.

Исследования последних лет позволили американскому физiku Форду шутливо утверждать: «Нехаотические системы столь же типичны, как курица с зубами».

Вернемся к началу главы. Мы уже писали, что в 50-е гг. XIX в. почти одновременно были открыты второе начало термодинамики и законы биологической эволюции.

Клаузиус сформулировал суть равновесной термодинамики: «Энергия мира постоянна, а его энтропия стремится к максимуму». Одновременно появляются дарвиновские основные законы биологической эволюции, имеющие фундаментальное значение и для науки, и для жизни. Тогда же и возник вопрос о совместимости классической термодинамики и представлений о временной эволюции, о спонтанном образовании все более сложных структур. Действительно, термодинамика утверждала, что энтропия всякой замкнутой системы возрастает со временем и достигает своего максимального значения, когда система приходит в состояние теплового равновесия. Иными словами, если система представлена самой себе, то она всегда будет стремиться достичь состояния с минимальной степенью упорядоченности, допускаемой начальными условиями. Но это противоречит возможности непрерывающегося процесса структурообразования. Если говорить о биологических системах, то для их жизнедеятельности не-

обходим постоянный обмен энергией и веществом с окружающей средой, т.е. они являются открытыми, и к ним не применимы законы статистической физики, относящиеся к замкнутым системам. В открытой системе может иметь место возрастание степени упорядоченности и уменьшения энтропии, что вполне согласуется с законами неравновесной статистической физики, сформулированными в работах Больцмана, Гиббса и Эйнштейна. Но их не только не применяли в биологии, но и подвергали сомнению возможность объяснения биологических явлений с позиции физики. Наверное, впервые эти сомнения были развеяны Э. Шредингером (Шредингер, 1972). Именно в его книге «Что такое жизнь? С точки зрения физики» было показано, что главная особенность биологических объектов — обмен энергией и веществом с окружающей их неравновесной средой — создает необходимые предпосылки для явления самоорганизации.

Впоследствии стало ясно, что сказанное относится к широкому классу систем (не только биологических), способных к самоорганизации, — систем открытых и нелинейных (Трубецков, Мchedлова, Красичков, 2002), (Трубецков, 2004), (Плак, Михайлов, 1983). Открытость системы означает наличие в ней источников и стоков, обмена веществом, энергией и информацией с окружающей средой.

Образование пространственного порядка из беспорядка, сложных пространственных структур в однородной среде и т.п. связывают с явлением самоорганизации.

Что же такое самоорганизация?

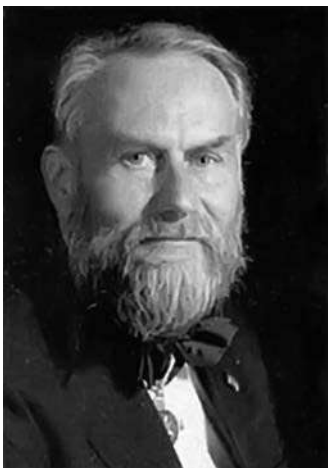
Классический пример самоорганизации — появление в подогреваемом снизу слое жидкости ячеек Бенара. Это структура из шестигранных призматических ячеек, которые возникают из-за «борьбы» неустойчивости и диссипации (трение, вязкость) в среде. В результате конвекции возникает неустойчивость, приводящая к нарастанию возмущений поля скорости и температуры в некотором интервале пространственных масштабов, что возможно только при наличии диссипации. В результате конкуренции выживает лишь решетка определенного масштаба. Шестигранники образуются вследствие синхронизации фаз решеток с разной пространственной ориентацией.

Еще один пример самоорганизации — процесс генерации электромагнитного излучения в квантовых генераторах — лазерах. Лазер непрерывного действия представляет собой сильно неравновесную открытую систему, образованную активными атомами

(например, смесью атомов гелия и неона), взаимодействующими с электромагнитным полем резонатора (колебательной системы, состоящей, например, из двух зеркал, одно из которых полупрозрачное). Такая система выводится из равновесия благодаря постоянному притоку энергии от внешнего некогерентного источника оптической накачки. Поступающая энергия не накапливается в лазерной системе, а непрерывно покидает ее в виде электромагнитного излучения и теплового потока. Пока интенсивность накачки мала, генерируемое лазером излучение состоит из случайных, не сфазированных между собой цугов волны. Однако при достижении некоторого значения мощности накачки лазерное излучение становится когерентным, т.е. начинает представлять собой один волновой цуг, в котором фазы волн на макроскопических расстояниях жестко скоррелированы. Такой переход к когерентной генерации можно интерпретировать как самоорганизацию — установление порядка в лазерной системе.

Заметим, что Герман Хакен, который ввел термин «синергетика», отталкивался в создании нового научного направления именно от эффектов лазерной генерации. Даже из рассмотрения двух по-существу классических примеров можно понять, что с явлениями самоорганизации связывают образование пространственного порядка из беспорядка, сложных пространственных структур в однородной среде. В дальнейшем будем следовать такому определению: самоорганизация — установление в диссипативной неравновесной среде пространственных структур (они могут эволюционировать во времени), параметры которых определяются свойствами среды и слабо зависят от источника неравновесности (энергии, массы и т.д.), начального состояния среды и условий на границах.

Все сложные природные системы — от галактики до клетки, от циклона в атмосфере, до водоворота в ручье — открытые и диссипативные системы. Более того, практически все они нелинейные. Примерами таких глобальных систем могут служить Мировой океан и климатическая система Земли, включающая атмосферу, гидросферу и криосферу (лед и снеговой покров). В этих системах должны происходить процессы самоорганизации. К примерам самоорганизации несомненно относятся зарождение ураганов и тайфунов, колебания границ ледниковых покровов на суше и на море, формирование и распад фронтов в атмосфере и океане, процессы в мантии Земли.



Герман Хакен (род. 12 июля 1927 г.) — немецкий физик-теоретик, основатель синергетики. Изучал физику и математику в университетах Галле (1946—1948) и Эрлангена (1948—1950), получив степени доктора философии и доктора естественных наук. С 1960 г. является профессором теоретической физики университета Штутгарта. До ноября 1997 г. был директором Института теоретической физики и синергетики университета Штутгарта.

С декабря 1997 г. является почетным профессором и возглавляет Центр синергетики в этом институте, а также ведет исследования в Центре по изучению сложных систем в университете Флориды (Бока Рэтон, США).

Основополагающие работы Г. Хакена, посвященные синергетике: Синергетика. М.: Мир, 1980; Синергетика. Иерархии неустой-

чивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985; Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991.

Не меньшее число примеров саморегуляции можно найти и в человеческом обществе.

Следует особо подчеркнуть, что явления самоорганизации в неравновесных системах принципиально отличаются от явлений упорядочения (фазовых переходов) в равновесных системах. В последних порядок возрастает при понижении температуры: жидкость с понижением температуры превращается в твердое тело, спины отдельных атомов могут выстраиваться, образуя упорядоченные структуры, свойственные ферро- или антиферромагнетикам, в металлах может осуществляться переход к состоянию, характерному для феномена сверхпроводимости. Очевидно, что природа равновесных фазовых переходов и эффектов самоорганизации в открытых системах различны. Но между этими явлениями существует глубокая аналогия: в обоих случаях имеет место процесс перестройки или возникновения порядка, если последний понимать как нарушение симметрии.

Возвратимся к указанным выше примерам. Действительно, однородная жидкость более симметрична, чем та же жидкость после возникновения даже регулярных конвективных течений в экспериментах Бенара; кристалл, получающийся в результате охлаждения, менее симметричен, чем исходная жидкость; парамагнетик со случайной ориентацией магнитных моментов отдельных атомов симметричнее ферромагнетика, в котором все эти моменты вы-

строены в одном направлении и уже нет пространственной изотропности. Однородность среды, т.е. симметрию по отношению к трансляциям в пространстве или во времени, нарушает возникновение любой пространственной или временной структуры. Самоорганизация тесно связана с еще одним глобальным природным явлением — с турбулентностью¹. Оба эффекта наблюдаются в сильнонеравновесных системах потокового типа.

В задаче Бенара при высоких разностях температур система переходит в режим турбулентной конвекции, в то время как интенсивность внешнего воздействия мала, состояние системы (открытой системы) близко к равновесному. Иными словами, при увеличении интенсивности внешнего воздействия происходит переход от режима теплового равновесия к турбулентному. Переход к турбулентности может происходить скачком или может занимать некоторый интервал значений параметров, характеризующих степени внешнего воздействия на рассматриваемую систему. В последнем случае переход к турбулентности осуществляется путем последовательного усложнения регулярных структур, образование которых и есть самоорганизация в неравновесных открытых системах (см., например, Трубецков, 2004).

Физическая картина турбулентности, соответствующая сказанному выше, образно выражена в следующем четверостишии, написанном английским физиком Л. Ричардсоном в 1922 г.:

Big whirls make little whirls
Which feed on their velocity,
Little whirls have smaller ones
And so on into viscosity.

Почти дословный перевод звучит так:

Большие вихри рождают малые завихрения,
Которые питаются их скоростью,
Малые завихрения порождают еще меньшие,
Пока все не погубит вязкость.

В журнале «Успехи математических наук», посвященном юбилею академика А.М. Обухова, одного из классиков теории турбулентности, есть стихотворный вариант перевода:

¹ Одно из определений турбулентности звучит так. Турбулентностью называется такое состояние среды, при котором возбуждены движения (турбулентные пульсации) разных масштабов, причем имеет место перекачка энергии между ними. Под масштабом понимают порядок величины тех расстояний, на протяжении которых существенно меняется скорость движения.

В поток бурлящий бросив взгляд,
Вихрей увидишь там каскад:
Меньшой у большего энергию берет,
Пока мельчайших вязкость не сотрет.

Типы упорядоченного поведения сильнонеравновесных открытых систем могут быть разными. Это диссипативные структуры (по И.Р. Пригожину), которые образуются и сохраняются благодаря обмену энергии и веществом с внешней средой в неравновесных условиях. Другой тип регулярного поведения — периодические автоколебания или для распределенных систем их аналоги — автоволны. Перечень структур легко продолжить.

Исследования последних десятилетий показали, что самоорганизация, т.е. возникновение, развитие и гибель макроскопических структур в неравновесных условиях, характерна для физических, химических, биологических, социальных и других систем. Важно, что установление общих закономерностей самоорганизации открывает перспективы создания сложных искусственных самоорганизующихся систем. Кроме того, могут появиться возможности управления процессами эволюции в уже существующих природных системах, а также возможности искусственного создания существ с заданным поведением и свойствами. Это приведет к радикальному изменению окружающего мира.

Тем, кого заинтересует вопрос о возникновении нелинейной науки, развитии ее идей, о судьбах, порой трагических, ее создателей, иными словами, — история нелинейной науки, можно порекомендовать книгу (Трубецков, 2013).

1.4. Эволюция биосферы и ноосфера

Важнейшую роль в современной научной картине мира играет концепция В.И. Вернадского биосферы и ноосферы. В ней жизнь предстает как целостный физический, геохимический, биологический эволюционный процесс, входящий как особая составляющая в космическую эволюцию. Именно осознание этой целостности во многом определяет стратегию дальнейшего развития человечества.

Со второй половины XX в. частные научные концепции, теряя свою автономность, все больше становятся фрагментами целостной научной картины мира. Они соединяются в блоки общей картины, которые характеризуют неживую природу, органический мир, социальную жизнь, реализуя каждая в своей области идеи универсального эволюционизма.

Современная научная картина мира основана на единстве и многообразии разных наук. В ней нет стремления к унификации всех областей знаний, нет стремления свести все к принципам одной какой-либо науки. Важной концепцией в картине мира являются представления о биосфере и ноосфере.

Биосфера (от греч. *bios* — жизнь и *sphaire* — сфера) — одна из оболочек (сфер) Земли, состав и энергетика которых определены прошлой или современной деятельностью живого вещества. В 1875 г. австрийский геолог Э.Зюсс предложил названия оболочек земной коры: водную оболочку он называл гидросферой, твердую — литосферой, а область земной коры, охваченную жизнью, — биосферой. Еще ранее газовая оболочка Земли получила название атмосферы. Однако широкое распространение термин «биосфера» получил полвека спустя в результате работ В.И. Вернадского, который стал обозначать биосферой всю ту наружную область планеты Земля, в которой не только существует жизнь, но которая в той или иной степени видоизменена или сформирована жизнью.

Н.В. Тимофеев-Ресовский в 1968 г. в статье «Биосфера и человечество», посвященной памяти В.И. Вернадского и В.Н. Сукачева, четко обозначил значимость опасений и тревог за судьбу человечества: «Биосфера Земли формирует все окружение человека. И небрежное отношение к ней, подрыв ее правильной работы будет означать не только подрыв пищевых ресурсов людей и целого ряда нужного людям промышленного сырья, но и подрыв газового и водного окружения людей. В конечном счете люди без биосферы или с плохо работающей биосферой не смогут вообще существовать на Земле. Из этого видно, что это действительно проблема номер один и проблема срочная» (Тимофеев-Ресовский, 1996).

Что же такое биосфера с позиций сегодняшнего дня? Она включает в себя тропосферу, гидросферу, верхнюю часть литосферы, которые взаимосвязаны сложными биохимическими циклами миграции вещества и потоками энергии. Активная часть биосферы — совокупность всех экосистем (биогеоценозов). Все экологические ниши, пригодные для жизни, заняты в биосфере, возникшей около 4 млрд лет назад одновременно с появлением жизни на Земле в виде примитивных протобиогеоценозов в первичном Мировом океане. 450 млн лет назад живые организмы стали заселять сушу, где их эволюция ускорила¹, и в результате со-

¹ Возможно, это произошло потому, что экологические условия на Земле оказались более жесткими, чем в океане.

отношение числа видов животных и растений в Мировом океане и на суше составляет примерно 1:5.

Основными факторами эволюции биосферы являются:

- геологические, космические (абиотические);
- изменчивость, т.е. мутации, наследственность, борьба за существование, естественный отбор (биотические);
- антропогенные, благодаря которым биосфера постепенно обретает черты ноосферы.



Владимир Иванович Вернадский (28 февраля (12 марта) 1863, Санкт-Петербург — 6 января 1945, Москва) — выдающийся русский и советский учёный, естествоиспытатель, мыслитель и общественный деятель; создатель многих научных школ. Один из представителей русского космизма. В круг его интересов входили геология и кристаллография, минералогия и геохимия, организаторская деятельность в науке и общественная деятельность, радиogeология и биология, биогеохимия и философия.

Владимир Вернадский родился 28 февраля (12 марта) 1863 г. в Санкт-Петербурге. В 1868 г. из-за неблагоприятного климата семья Вернадских переехала в Харьков — один из ведущих научных и культурных центров тогдашней Российской империи. В 1885 г. В.И. Вернадский окончил физико-математический факультет Петербургско-

го университета; в 1890 г. — приват-доцент кафедры минералогии Московского университета. В 1897 г. защитил докторскую диссертацию в Петербургском университете. В 1898—1911 гг. — профессор Московского университета.

Деятельность Вернадского оказала огромное влияние на развитие наук о Земле, становление и рост АН СССР, на мировоззрение многих людей. В 1915—1930 гг. — председатель Комиссии по изучению естественных производительных сил России, был одним из создателей плана ГОЭЛРО. Комиссия внесла огромный вклад в геологическое изучение Советского Союза и создание его независимой минерально-сырьевой базы. С 1912 г. академик Российской академии наук (позже Академия наук СССР). Один из основателей и первый Президент (27 октября 1918) Украинской академии наук. В 1920—1921 гг. — ректор Таврического университета в Симферополе. В 1922—1939 гг. — директор организованного им Радиевого института. В период 1922—1926 гг. работал за границей в Праге и Париже. В 1927 г. организовал в Академии наук СССР Отдел живого вещества.

Из философского наследия Вернадского наибольшую известность получило учение о ноосфере; он считается одним из основных мыслителей направления, известного как русский космизм. В 1943 г. «за многолетние выдающиеся работы в области науки и техники» к 80-летию Вернадский был удостоен Сталинской премии I степени.

Биосфера мозаична по структуре и составу, что проявляется в геохимическом и геофизическом разнообразии лика Земли (горы, ущелья, равнины, озера, океаны и т.д.) и в неравномерности распределения живого вещества по территории планеты как в прошлые эпохи, так и в настоящее время. Живое вещество — совокупность всех живых организмов — формирует особое состояние пространственно-временных процессов, определяя эволюционные возможности биосферы. Живое вещество, улавливая, аккумулируя и трансформируя космическую и солнечную энергию, выступает в роли преобразователя планеты, ее основной геологической силой. Эта сила создает «лик» планеты, определяет ее красоту и гармонию, индивидуальность, выражаясь в самой организованности биосферы, в удивительном многообразии форм растительной и животной жизни, в облике и красках ландшафтов, в звучании жизни.

В учении о биосфере важным является аспект, связанный с изучением глобальных эффектов воздействия человечества на структуру и функции биосферы (разработка полезных ископаемых, получение новых для биосферы веществ, загрязнение природных сред, преобразование ландшафтов, выход человека в космос и др.) и породивший глобальную проблему «Биосфера и человечество».

Как справедливо пишет Г.Г. Малинецкий (Малинецкий, 2006), «ограниченные возможности биосферы вынуждают сменить весь набор базовых технологий, обеспечивающих существование человечества. Причем, прежде всего это касается социогуманитарных технологий, технологий управления и только потом сельскохозяйственных, промышленных и прочих. К сожалению, исполнилось пророчество В.И. Вернадского — человечество действительно стало геологической силой, не став при этом стратегическим субъектом, готовым взять на себя ответственность за собственную судьбу. “Общество риска”, которое прогнозировал немецкий социолог Ульрих Бек, после Чернобыльской аварии стало реальностью. От этого вызова нельзя уклониться. Отсутствие решения ключевых проблем тоже станет решением. Скорее всего неудовлетворительным». И далее: «Тут и возникла сверхзадача, которая, вероятно, во все большей степени будет определять и развитие синергетики, и всей науки в целом: проблема долгосрочного прогноза, исследование доступных цивилизации альтернатив исторического развития».

Что такое биосфера с точки зрения нелинейной науки? Несомненно, что это грандиозная нелинейная система, которая даже без активных внешних воздействий способна к существенным перестройкам своей структуры. Биосфера как сложная саморазвивающаяся система обладает неким набором механизмов, одни из которых играют роль положительных обратных связей (они отвечают за развитие системы, рост ее сложности и разнообразие составляющих элементов), а другие — отрицательных обратных связей (они отвечают за уже существующие квазиравновесие и за стабильность элементов системы). Больше внимание уделяется в настоящее время изучению механизмов отрицательной обратной связи, что естественно, поскольку человек живет в определенных условиях, к которым адаптировался.

Анализируя состояние теории биосферы, Н.Н. Моисеев (Моисеев, 1998) пишет следующее: «Но изучение отдельных механизмов, даже в их сочетании, еще недостаточно для построения теории биосферы. А без такой теории говорить о стратегии человечества с биосферой очень трудно и опасно... Теория развития биосферы не может считаться полноценной, если не изучено множество ее бифуркационных состояний, условий перехода из одного состояния в другое и структура аттракторов, т.е. окрестностей более-менее стабильных состояний».

Из-за сложности системы уравнений, описывающих функционирование биосферы, единственным эффективным способом анализа ее поведения является компьютерное моделирование. Это — единственный путь, поскольку никаких реальных экспериментов с биосферой человек себе позволить не может. Такая компьютерная модель под названием «Гея» была создана группой Н.Н. Моисеева. Она объединила модели атмосферной и океанической циркуляции с моделью углеродного цикла и энергетической биосферы, включающей потоки солнечной радиации, образование облаков, выпадение снега и т.п. Как описано в главе 5, в рамках этой модели была подтверждена гипотеза «ядерной зимы» и «ядерной ночи». Результат был трагическим: «...Земля после столь мощного воздействия перестала быть похожей на Землю, которую мы знаем в четвертичном периоде. И эта Новая Земля уже не могла служить ойкуменой человечества, Земля сохранится очень обедненная и самое главное — без людей» (Моисеев, 1998).

Был сделан и еще один важный вывод: переход в новое качественное состояние и потеря порога устойчивости может прои-

зойти под действием незначительных, но постоянно действующих возмущений. Вот это-то и особенно опасно. Н.Н. Моисеев так комментирует результаты, полученные в рамках математической модели «Гея» (Моисеев, 1998): «Эти результаты невольно отсылают нас к идеям синергетики. По-видимому, биосфера может иметь несколько совершенно различных квазистационарных режимов. Иными словами, целый ряд различных аттракторов. И не исключено, что процесс эволюции биоты, который привел к появлению *homo sapiens*, мог быть осуществлен только в окрестности одного из аттракторов. Переход в окрестность другого аттрактора исключит возможность разумной жизни на планете. Таким образом, теория биосферы должна представлять собой не просто совокупность изученных механизмов функционирования отдельных элементов биоты и абиотических составляющих биосферы, взаимодействие которых способно реализовать принцип Ле-Шателье (что, разумеется, совершенно необходимо). Для того, чтобы обеспечить возможность дальнейшего развития цивилизации, нам предстоит изучить динамику биосферы как нелинейной системы, изучить структуру ее аттракторов и границы между областями их притяжений.

Итак, возникает новая фундаментальная научная дисциплина — изучение биосферы как динамической системы. И она носит абсолютно прикладной характер, поскольку делается научной базой судьбоносных решений для человечества. Заметим еще раз, что переход биосферы из одного состояния в другое вовсе не обязательно требует мгновенных сверхнагрузок, как при атомных взрывах и последующих пожарах. Катастрофа может подкрасться и незаметно. И стратегия развития человечества не просто должна быть согласована с развитием биосферы, но должна быть такой, чтобы развитие биосферы происходило в нужном для человечества канале!

Другими словами, обеспечение коэволюции человека и биосферы (или, что то же самое, для реализации стратегии *sustainable development*) требует развития специальной синтетической научной дисциплины.

Работа по созданию такой дисциплины по существу уже началась. Ее естественной составляющей является экология».

В этом смысле обращает на себя внимание книга Богданкевича (2002), которая посвящена не просто вопросам экологии, поскольку охватывает весьма широкий спектр проблем: эволюция

мотивации людей в процессе взаимодействия с окружающей средой и влияние вызванных человеком изменений в природе на его оценки параметров развития цивилизации и некоторых обстоятельств ее развития.

В.И. Вернадский еще в молодые годы размышлял над вопросами о месте и роли разума как планетарно-космической силы. Так, в дневнике 29 июня 1893 г. он писал: «Есть один факт развития Земли — это усиление сознания, хотя я допускаю, что может быть через миллион лет пойдет обратный процесс» (Страницы автобиографии В.И. Вернадского, 1981).

Идея об усилении роли разума в развитии общества не является достоянием лишь конца 30-х гг. XX в., когда французский ученый и философ Э. Леруа, а затем его соотечественник П. Тейяр де Шарден и академик В.И. Вернадский стали использовать понятие «ноосфера». В частности, П. Тейяр де Шарден образно писал о совокупной мыслительной работе человечества следующим образом.

«Вокруг искры первых рефлектирующих сознаний стал разгораться огонь. Точка горения расширилась. Огонь распространялся все дальше и дальше. В конечном итоге пламя охватило всю планету. Только одно истолкование, только одно название в состоянии выразить этот великий феномен — ноосфера. Столь же обширная, но, как мы увидим, значительно более цельная, чем все предыдущие покровы, она действительно новый покров, “мыслящий пласт”, который, зародившийся в конце третичного периода, разворачивается с тех пор над миром растений и животных — вне биосферы и над ней» (Тейяр де Шарден, 1987).

Идея «царства разума» была высказана в эпоху Просвещения, когда о глобальных экономических проблемах еще не думали. Но «просветительский разум» оказался невостребованным, и стихийное шествие капитализма по планете привело по сути к формированию индустриально-потребительских, а не ноосферных ценностей.

Сегодня ноосферу определяют следующим образом.

Ноосфера (от греч. *noos* — ум и *sphera*; сфера разума) — гипотетическое будущее состояние общества и его взаимодействие с природой, в котором приоритет будет принадлежать разуму.

В.И. Вернадский был одним из первых, кто «подключил» к анализу исторического времени и время геологическое. Именно в этом новизна его мысли. По его мнению, вырастание ноосферы

из биосферы есть природное явление, более глубокое и мощное в своей основе, чем человеческая история. В.И. Вернадский считал, что становление ноосферы — главное направление развития человечества и что она появится стихийно, как все этапы эволюции человечества.

Однако когда обнаружились и обострились глобальные проблемы, угрожающие гибелью цивилизации, стало ясно, что невозможно стихийное становление ноосферы, что ее приближение реально только благодаря социально-технологическому проектированию будущего с помощью человеческого разума и прежде всего ноосферно ориентированной науки.

В процессе реального прогресса на пути в ноосферу наука будет, что и предполагал В.И. Вернадский, играть доминирующую роль, как и сопряженные с ней интеллектуально-духовные и нравственно-культурные формы деятельности.

Выше мы определили ноосферу как некую умозрительно-концептуальную конструкцию, как виртуально-утопическое общество.

В ушедшем XX веке ноосфера стала обретать практические очертания благодаря принятию мировым сообществом в Рио-де-Жанейро в 1992 г. стратегии устойчивого развития. Дело в том, что учение о ноосфере может быть использовано для концептуального продвижения вперед идей устойчивого развития (до сих пор эти две концептуальные системы разрабатывались самостоятельно).

Среди главных черт современного этапа учения о ноосфере выделяют следующие.

1. Биосферу не нужно насильственно превращать в ноосферу. Ее нужно сохранять путем снижения антропогенного давления почти на порядок и регуляции окружающей среды.

2. Для становления ноосферы необходима реализация принципа преемственности поколений как принципа выживания и непрерывного развития цивилизации. Суть этого принципа — в равенстве возможностей поколения людей на планете (включая и будущее) удовлетворять свои жизненные потребности.

3. Необходимо включить в исследование ноосферы процессы глобализации, глобальных проблем, в том числе космическую деятельность и широкомасштабное освоение Вселенной.

4. Должно быть новое осмысление проблемы обеспечения безопасности в связи с переходом к модели устойчивого развития.

5. Становление ноосферы должно носить принципиально планетарный характер, вплоть до становления космосферы.

6. Предполагается, что создание сферы разума будет сопровождаться усилением рационально-справедливых и нравственно-гуманистических ценностей и формированием ноосферной культуры, включающей в себя экологическую культуру и биосферную этику.

7. Необходимо формирование опережающих механизмов деятельности, в том числе мыслительно-коммуникационной (ноосферный интеллект), управленческой (упреждающее принятие решений и упреждающее управление), новые модели образования (ноосферно-опережающее образование), ноосферно-опережающей науки.

Следует заметить, что соответственно процессу формирования планетарного разума меняется и сама наука. В ней усиливается сочетание глубины и всесторонности научного исследования. В.И. Вернадский, отмечая новое качество науки XX века, писал: «Мы все больше специализируемся не по наукам, а по проблемам. Это позволяет, с одной стороны, чрезвычайно углубляться в изучаемые явления, а с другой — расширить охват его со всех точек зрения» (Вернадский, 1998).

Ноосферное мировоззрение исходит из представления об особой роли человека во Вселенной как единственного (в рамках современного научного видения) носителя разума и вырабатывает формы диалога между людьми разных культурных традиций, национальностей, религиозных конфессий, поколений и гендерных отличий.

Дополним сказанное рассуждениями Н.Н. Моисеева из книги (Моисеев, 1998).

«Когда в начале XX века Вернадский произнес вещую фразу о том, что однажды наступит время, когда человеку придется взять на себя ответственность за развитие природы и общества, вряд ли он думал, что это время наступит столь скоро. <...> Структура общественного устройства должна претерпеть изменения».

И далее Н.Н. Моисеев подчеркивает, что перед человечеством в будущем две альтернативы: первая — продолжать жить по-старому, совершенствуя свои технологии; вторая — переход к совершенно новому типу цивилизации. Первый путь ведет к общепланетарному экологическому кризису и в конце концов — к деградации и исчезновению человека как биологического вида.

«Вторая альтернатива основывается на гипотезе о том, что человечество сможет опереться на свой Коллективный Разум и найти пути создания общества, способного к совместному развитию с биосферой, т.е. перейти в эпоху ноосферы...

Мы не знаем, каким будет общество будущего. И вряд ли стоит гадать! Но мы знаем, что потребуется высокий уровень интеллигентности и знаний. Прежде всего знаний о тех формах своих взаимоотношений с Природой, которые будут способны обеспечить режим коэволюции. Поэтому путь к эпохе ноосферы начинается с образовательных программ — программ, которые будут содержать знания о том, что недопустимо, что может нарушить стабильность человеческого дома» (Моисеев, 1998).

Литература к главе 1

Арзоянц Э. Глобализация: катастрофа или путь к развитию? М.: Новый век, 2002.

Богданкевич О.В. Лекции по экологии. М.: Физматлит, 2001.

Браун Д. Чарльз Дарвин. Происхождение видов. М.: АСТ, 2009.

Вернадский В.И. Философские мысли натуралиста. М.: Наука, 1988.

Данилов Ю.А. Прекрасный мир науки. М.: Прогресс-Традиция, 2008.

Дарвин Ч. Происхождение видов путем естественного отбора. М.: Просвещение, 1987.

Заходер Б. Заходерзости. Тверь: Век-2, 1997.

Ильин И.В., Урсул А.Д. Эволюционная глобалистика (концепция эволюции глобальных процессов). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009.

Ильин И.В., Урсул А.Д. Глобальный эволюционизм. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012.

Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Синергетика как новое мировидение: диалог с И. Пригоженым // Вопросы философии. 1992. № 12.

Крайтчи́лд Д.П., Фармер Дж.Д., Паккард П.Х., Шоу Р.С. Хаос // В мире науки. 1987. № 16.

Ласло Э. Век бифуркации. Постигание изменяющегося мира // Путь. 1995. № 7.

Лотман Ю.М. Избранные статьи. Таллин: Александра, 1992. Т. 1.

Малинецкий Г.Г. Пределы синергетики // Знание-сила. 2006. № 1. С. 60.

Моисеев Н.Н. Расставание с простотой. М.: Аграф, 1998.

Полак Л.С., Михайлов А.С. Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах. М.: Наука, 1983.

Пригожин И. Кость еще не брошена. Послание будущим поколениям // Наука и жизнь. 2002. № 11. С. 4.

Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: УРСС, 2003.

Степин В.С. Научная картина мира // Новая философская энциклопедия. Т. 3. М.: Мысль, 2001.

Тейяр де Шарден П. Феномен человека. М.: Наука, 1987.

Тернер М. Происхождение Вселенной // В мире науки. Спецвыпуск. 2009. № 11. С. 16.

Трубецков Д.И. Введение в синергетику. Хаос и структуры. М.: Едиториал УРСС, 2004.

Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2002.

Трубецков Д.И. Наука о сложностях в лицах, датах и судьбах. Как закладывались основы синергетики: Пиршество духа и драма идей. М.: ЛИБРОКОМ, 2013.

Тюрюканов А.Н., Федоров В.М., Тимофеев-Ресовский Н.В. Биосферные раздумья. М., 1996.

Урсул А.Д., Урсул Т.А. Универсальный эволюционизм. М.: РАГС, 2007.

Урсул А.Д. Научная картина мира XXI века: темная материя и универсальная революция // Безопасность Евразии. 2009. № 1. С. 227.

Филитова Н.В. Страницы автобиографии В.И. Вернадского. М.: Наука, 1981.

Френкель В.Я., Чернин А.Д. Гергий Галов — гигант трех наук: от альфа-распада до Большого взрыва. М.: ЛИБРОКОМ, 2013.

Черепашук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино: Век-2, 2003.

Чернин А.Д. Космология: Большой взрыв. Фрязино: Век-2, 2005.

Шредингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физики. М.: Атомиздат, 1972.

Lighthill J. The recently recognized failure of predictability in Newtonian dynamics // Proc. of the Royal Society. 1986.



НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ГЕОПРОЦЕССОВ

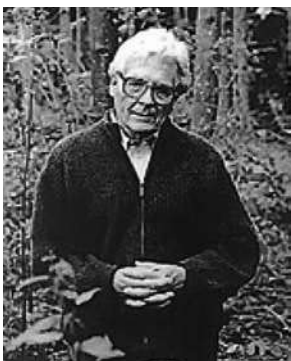
2.1. Вводные замечания

Земля является сложной открытой системой, в истории которой на протяжении почти 5 млрд лет происходили и наблюдаются ныне процессы самоорганизации. Эволюция Земли, по данным исторической геологии, характеризуется необратимостью и этапностью. По определению академика Д.В. Наливкина, «этап — это часть пути, чем-либо отличающаяся» (Наливкин, 1978). Этапы спокойного развития прерываются фазами неустойчивости, кризисов, бифуркаций, определивших выбор и особенности сценария дальнейшего развития планеты. Это характерно как для Земли в целом, так и может быть прослежено отдельно для геологических и биосферных глобальных процессов.

Сложность исторического пути планеты ярко проявляется, если рассматривать коэволюцию (совместное, сопряженное, взаимосвязанное развитие) оболочек планеты (глобальных систем — геосфер), являющихся наиболее крупными внутрипланетарными образованиями. Закономерности развития во многом определяются именно коэволюцией физических оболочек планеты (каменного субстрата, гидросферы, атмосферы), живого вещества (биосферы) и человека, его разумной мысли (ноосферы).

В 1970-е гг. английский инженер и мыслитель Джеймс Лавлок предложил концепцию Геи (Lovelock, 1972), которая занимает заметное место в современной глобальной экологии и науках о Земле благодаря прежде всего работам Дж. Лавлока и Л. Маргелис, перекликающимся с рядом глобалистических идей В.И. Вернадского. Суть заключается в том, что Земля в целом обладает некоторыми свойствами живой системы (гомеостаз, саморегуляция и др.), что во многом определяет нелинейность планетарных процессов. Это положение стало общепризнанным. «Земля — наш Дом и дом всех живых существ. Сама Земля является живым организмом» — записано в преамбуле Хартии Земли (Хартия Земли, 1997). Появилось такое новое научное направление, как геофи-

зиология. Планетарная целостность ярко воспринимается также в геологии. Известный геолог А.П. Карпинский использовал формулу «Геологу нужна вся Земля» (Карпинский, 1945–1949), стремясь к построению общей модели планеты. В 1993 г. для обсуждения острейших глобальных проблем была создана всемирная общественная организация «Совет Земли». Все это говорит о фундаментальной роли изучения общепланетарных геосистем и геопроцессов в развитии современной глобалистики.



Джеймс Эфрейм Лавлок (род. 26.07.1919) — британский естествоиспытатель. Родился в Лондоне, работал в Национальном институте медицинских исследований. Затем, проработав в НАСА, в 1964 г. объявил себя независимым ученым. Два года спустя обнаружил присутствие в атмосфере хлорфторуглеродов (ХФУ). Создатель гипотезы Геи (Земля функционирует как один живой суперорганизм), сторонник использования атомной энергии. В 2006 г. предсказал, что к концу текущего века в результате глобального потепления «миллиарды людей погибнут, а считанные пары выживших останутся в Арктике, где климат останется выносимым». Согласно его

прогнозам, к 2100 г. 80% людей исчезнут, и новый климат продержится следующие 100 000 лет. Люди мигрируют на полюсы Земли, а в Антарктиде появятся мегаполисы (по www.elementy.ru).

Линн Маргулис (Маргелис) (05.03.1938 — 22.11.2011) — американский биолог (в первую очередь протистолог), создатель современной версии теории симбиогенеза. Профессор Массачусетского университета в Амхерсте. В 1983 г. в СССР вышла ее известная книга «Роль симбиоза в эволюции клетки». Наиболее известна исследованиями клеточных органоидов и развитием эндосимбиотической теории происхождения клетки, идею которой впервые выдвинул русский ботаник А.С. Фаминцын (1835–1918). Л. Маргулис — одна из авторов названия таксона *Eukaryota* Whittaker & Margulis, 1978 (эукариоты), объединяющего все организмы, клетки которых содержат ядра (растения, грибы и животные) (по www.astrovips.com).



Целенаправленное изучение синергетических эффектов в науках о Земле в России началось относительно недавно. В 1990-е гг. преимущественно благодаря работам Ю.М. Пущаровского (Пу-

щаровский, 1993, 1995 и др.) появились попытки обобщения фактов и дискуссии о линейности и нелинейности в геологии. По этой тематике проведено несколько научных конференций и семинаров различных уровней, постоянно публикуются труды, очерчивается новое направление. Русскоязычные работы по синергетике и нелинейным явлениям появились в таких науках о Земле, как геодинамика (Пушаровский, 1994а, б; Казанцева, 2002 и др.), океанология (Сеидов, 1989а и др.), гидрология (Коваленко, 2002; Найденов, 2004), геология и геофизика (Вопросы..., 1981; Геологическая..., 1991; Горяинов, 1989, 1995; Иванюк, 1997; Иванюк и др., 1996; Кейлис-Борок, 1989; Летников, 1990; Пушаровский, 1993, 1995; Сеидов, 1989б; Соколов, 1998; Фадеев, 1993 и др.), геоэкология (Летников и др., 2002) и метеорология (Монин, 1988; Монин, Яглом, 1965; Шакина, 1990 и др.). Примерно в это же время наблюдается всплеск крупных специальных работ и научных мероприятий зарубежных исследователей (Fractal..., 1994; Gore, 1992; International Symposium on Fractals..., 1993; Korvin, 1995; Nagahama, 1997; Rodriguez-Iturbe, Rinaldo, 1997; Turcotte, 1992; Turcotte, Schubert, 1982 и др.). Можно также привести пример серии книг по синергетике издательства Springer (в их числе классические монографии Г. Хакена (1980, 1984, 1985)) и журналы *Nonlinear Processes in Geophysics* (издается с 1994 г.), *Chaos, Nonlinearity Physica D*, *Non-linear geodynamics*, *Natural Hazards* и др.

Изучение нелинейности геосистем и геопроцессов разного ранга (от локальных до глобальных) чрезвычайно важно как с теоретической, так и с практической точки зрения. Более того, некоторые философы рассматривают понятие нелинейности как «фундаментальный концептуальный узел новой парадигмы», «...новая парадигма есть парадигма нелинейности» (Князева, 1995). «Оказывается, нелинейное и хаотическое — это правило в природе и обществе, а линейное и упорядоченное — это скорее исключения, которые ученые привыкли считать правилом» (Князева, 1995, Князева, Курдюмов, 1993, 2002, 2007). Вместе с тем, как отмечает В.И. Чупрынин (2008), эти представления пока слабо отражены в географических работах. Лишь в последние 15–20 лет начали появляться отдельные работы, в которых им и идеям синергетики уделяется внимание (Александров, 1996; Арманд, 1980, 1988а, б, 2003; Арманд, Ведюшкин, 1989; Арманд, Кайданова, 1999; Зейдис и др., 2001; Известия..., 1993; Поздняков, Черванев, 1990; Самоорганизация..., 2003; Чупрынин, 1985, 2003, 2004, 2008; Шупер, 1995, 2001).

В целом уже сформировалось представление о географических объектах как системах, которые обладают иерархической структурой (Чупрынин, 2008). Например, выделяют географическую оболочку, в которую включаются все объекты Земли, изучаемые географией. К ним, согласно учению В.Б. Сочавы (1978), относятся природные географические объекты — геосистемы. Вслед за В.И. Чупрыниным (2008) будем понимать под геосистемами более широкий, чем подразумевал В.Б. Сочава, класс систем, рассматривая их как системы, принадлежащие Земле. Примерно такого же представления придерживался ряд ученых, например В.И. Беляев (Беляев, 1978, с. 10), который говорил, что геосистемы «являются составными и взаимосвязанными частями глобальной системы Земли со всеми ее оболочками» или это «системы, которые можно выделить в структуре Земли как планеты» (с. 3).

Разнообразные следствия нелинейности в геосистемах легко обнаруживаются (Чупрынин, 2008). Например, связь осадков (скорость выпадения воды на поверхность водосбора) — стока (расход в устьевой части главной реки водосборного бассейна), как правило, нелинейная. Осадки, выпадая на поверхности земли, затем создают различные виды влагозапасов и влагопотоков, и в русло поступает лишь их часть. Часть осадков вначале заполняет понижения в рельефе (незаполненные озера, водохранилища и др.), пропитывает почву до уровня полевой влагоемкости. Лишь после этого процесс переходит в другой режим. Этот процесс сильно зависит от интенсивности осадков. Нелинейность здесь может иметь критический характер переключения. Часть поступающих к поверхности осадков затем испаряется с поверхности. Этот процесс нелинейно зависит от температуры испаряющейся воды. На это особое внимание обратил В.И. Найденов (Найденов, 1992а, б). У поверхности воды образуется очень тонкий слой паровоздушной смеси, в котором концентрация водяных паров зависит от температуры поверхности. Из уравнения Клаузиуса-Клайперона следует:

$$\phi = \phi(\bar{T}) \exp \left\{ \frac{L}{R} \left(\frac{T}{\bar{T}} - \frac{1}{T} \right) \right\},$$

где ϕ , T — упругость водяного пара и температура; L — удельная теплота парообразования; R — газовая постоянная водяного пара; $\bar{T}$ — некоторая фиксированная (среднегодовая) температура. Скорость испарения обычно прямо пропорциональна ϕ . Поэтому ско-

рость испарения нелинейно зависит от температуры, что, по мнению В.И. Найденкова, может порождать тепловую неустойчивость испарения — снова наблюдается нелинейный эффект. Динамика движения воды в русле также является нелинейной (о чем свидетельствует нелинейность гидродинамических уравнений, описывающих движение воды в русле), вследствие чего порождаются разнообразные эффекты (объяснить которые удастся, только учитывая нелинейность), такие как турбулентность, возникновение донных и плановых форм рельефа русла и т.д. (Чупрынин, 2008) (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Сложное строение отложений древней реки свидетельствует о нелинейности протекавших в речной системе процессов (Саратовское Поволжье, фото А.В. Иванова)

При исследовании динамики геосистем и решении геоэкологических проблем необходимо выделение характерных времен изменчивости изучаемых нелинейных процессов. Для жизнедеятельности человека важны прежде всего процессы, характерные времена которых попадают в диапазон от нескольких часов (даже нескольких десятков минут) до 100 лет. К этому интервалу времени относятся разнообразные техногенные и природные катастрофические явления (снежные лавины, сели, оползни (рис. 2.2),



Рис. 2.2. Разрушительные последствия нелинейного катастрофического оползневого процесса, спровоцированного как природными, так и антропогенными причинами (г. Саратов, фото А.В. Иванова)

обвалы горных пород, извержения вулканов, быстрые подвижки ледников, прорыв естественных плотин, землетрясения и др.); синоптические атмосферные процессы с характерными временами 1—30 суток, определяющие состояние погоды; сезонные процессы (от 1 до 12 месяцев); процессы, связанные с межгодовой изменчивостью (свыше 1 года до 10 лет); климатические процессы (от 10 до 100 лет и более).

С сезонными процессами связаны характеристики, которые определяют урожайность сельскохозяйственных культур, экологическую комфортность проживания и т.д. С межгодовой (выделяют характерные периоды колебаний 2—3 года, 5—6 и 11 лет) и вековой изменчивостью связано общее состояние животного и растительного мира, сельского хозяйства и др. От вековых изменений климата (важными характеристиками которого в настоящее время являются наблюдаемые потепление и возрастание в атмосфере содержания углекислого газа) существенно зависит взаимодействие природы и общества. Возникает вопрос о жизнеспособности и устойчивости развития человечества при дальнейшем сохранении тенденций (Урсул и др., 2012 и др.). Все эти

процессы в той или иной степени связаны с глобальной нелинейностью геосистем (Чупрынин, 2008).

Нелинейная геосистема может обладать множеством аттракторов (областей притяжения), переход между которыми осуществляется внешними воздействиями (шумами). Модель бистабильной тундровой системы с преобладанием либо травяных, либо моховых сообществ рассмотрена в работах С.А. Зимова и В.И. Чупрынина (Чупрынин, 1989а, 1991). В.И. Найденовым показана возможность существования у Каспийского моря, а также у других бессточных морей и озер двух (и более) устойчивых положений уровня моря (Найденов, 1992а, б, 2004; Найденов, Коженикова, 2001, 2002), т.е. многие из таких водоемов можно рассматривать как нелинейные триггерные системы. Такой подход позволил по-новому взглянуть на известную проблему изменения уровня Каспия. Примеры мультистабильных геосистем приведены в работах А.Д. Арманда, М.А. Ведюшкина (1989) и А.Д. Арманда, О.В. Кайдановой (1999). В них могут возникать альтернативные состояния типа «лес» и «степь» в лесостепной зоне или «лес», «степь» и «кустарник» в южной лесостепи.

В работе А.Д. Арманда и О.В. Кайдановой (1999) обращено внимание на важный факт проявления мультистабильности — возникновение резких ландшафтных границ, а также явление «затягивания» смещения ландшафтных границ при изменении климата. Триггеры уже достаточно давно обнаружены в биогеоценозах (Алексеев, 1976; Свирежев, 1987; Свирежев, Логофет, 1978). Известны детальные исследования влияния случайных возмущений (шумов) на такие системы. Вводятся также вероятности и меры устойчивости переходов из одного состояния в другое (Фрейдлин, Светлосанов, 1976 и др.). В результате развития нелинейной геосистемы неизбежно возникают бифуркации. Свойства интранзитивности (Физические основы..., 1977; Вербицкий, Чаликов, 1986), выявляемые при моделировании изменений климата Земли, являются косвенным свидетельством возникновения климатических бифуркаций. В глобальной истории человечества наблюдались различные бифуркации (Капица и др., 1997; Моисеев, 2000).

Наиболее продвинутые на сегодняшний день области приложения нелинейных идей в науках о Земле — геодинамика и геофизика. Геодинамика как эволюционная дисциплина приняла нелинейные представления наиболее естественным и органичным образом. Все элементы этих представлений (неустойчивость,

фазовые переходы, бифуркационные состояния, триггерный эффект, самоорганизация и пр.), свойственные эволюции сложных, термодинамически неравновесных (т.е. открытых, диссипативных) систем, здесь присутствовали всегда, но не всегда выдвигались на передний план как системообразующие. В геологическом институте РАН еще с конца 1950-х гг. целенаправленно изучались причины упорядоченности строения геологических объектов, которые привели к выводу о широкой распространенности явления самоорганизации в геологических процессах и о существенной нелинейности этих процессов.

По поводу происхождения проявлений упорядоченности высказывались разные мнения, укладывающиеся в две группы объяснений: 1) порядок навязывается геологическим системам извне и 2) упорядоченность возникает спонтанно, внутри геологических систем, являясь их неотъемлемым свойством. Во втором смысле и употреблялся термин самоорганизация. Вполне понятно, что обе эти группы по отношению к конкретным примерам имели веские основания и не исключали, а дополняли друг друга. Особенности же нелинейной характеристики геологических процессов состояли, как пишет А.В. Лукьянов (Лукьянов, 1985, 1987), в том, «что они не описываются математическими формулами, и конкретный вид линейного или нелинейного оператора нам не известен. Поэтому приходится обращаться к основному свойству линейного оператора — принципу суперпозиции (результат суммы воздействий равен сумме их результатов). Если этот принцип соблюдается, мы говорим о линейной зависимости, если нет, то о нелинейной, даже не зная конкретную математическую формулировку этой зависимости». Это замечание характеризует вполне типичную для большинства сфер приложения нелинейной динамики ситуацию, которую можно квалифицировать как стадию начального нелинейного осмысления. Ибо суть нелинейной динамики как универсального полидисциплинарного научного направления состоит в построении и исследовании математических моделей неравновесных систем.

В 1990-е гг. были опубликованы работы Ф.А. Летникова (Летников, 1992, 1993 и др.), где уже на строгом математическом уровне рассмотрена не только равновесная термодинамика, но и самоорганизация неравновесных природных физико-химических систем с геологическими следствиями. В частности отмечено, что для понимания эволюции геологических систем важно определить в каждом конкретном случае степень их устойчивости, ибо

в состоянии, близком к неустойчивому, любая система чутко реагирует даже на слабые и случайные внешние воздействия. В эту сферу входят все метастабильные системы, но даже среди них существует своя иерархия по степени реагирования на внешние шумовые воздействия, что определяется энергией связи между компонентами в этих системах. Так, воздействие ультразвука на систему жидкостей и газов в каменном субстрате (так называемую флюидную систему) приведет к ее существенным изменениям, в то время как это же воздействие на тело, сложенное плотными горными породами, не окажет никакого влияния.

Отличительная черта неустойчивой геосистемы — ее многовариантность, или мультиплетность, столь хорошо проявленная при эволюции рудообразующих флюидных систем, когда количественные соотношения и состав фаз, отличаемых флюидами, колеблются в широких пределах, а факторы самоорганизации таких систем играют огромную роль в их последующей консервации в скопление минеральных агрегатов. Одной из наиболее сложных для синергетики геологических систем представляется проблема обнаружения элементов самоорганизации на различных иерархических ступенях эволюции, когда последующая стадия может стирать информацию о предыдущей.

Вторая проблема — необходимость аналитического выражения обнаруженных синергетических признаков в терминах термодинамики, математической физики или путем создания адекватных математических или тепловых моделей изучаемого процесса. Ф.А. Летниковым предприняты успешные попытки решения этих проблем применительно к процессам самоорганизации при зарождении, росте и преобразовании минералов, а также к процессам тектонической и магматической (флюидной) активизации на разных этапах развития глобальных систем — литосферы и астеносферы Земли.

Уяснение благодаря сейсмотомографическим данным тектонической расслоенности литосферы и многоярусной природы мантийной конвекции наряду с обнаружившимся поразительным разнообразием и несомненностью нелинейных эффектов в глубинной геодинамике привело в 1994 г. к появлению новой глобально динамической нелинейной модели японских геологов (Miyama et al., 1994 и др.), в которой предпринята попытка синтезировать тектоническую триаду — тектонику роста (тектонику ядра Земли), плюмтектонику (распространяющуюся на всю мантию от ядра до границы 670 км) и тектонику плит (присущую зем-

ной коре и верхней мантии до границы 670 км). Примерно в эти же годы появились работы Б.А. Соколова (Соколов, 1990 и др.), где рассматриваются в качестве нелинейных процессы нефтегазообразования и предлагается автоколебательная модель нефтегазового месторождения.

Открывая третий семинар по нелинейной геодинамике в 2001 г., Ю.М. Пушаровский (2001) заметил, что интерес ученых к нелинейному развитию геопроцессов любого уровня, в том числе глобального, принимает взрывной характер. И тем не менее, в подавляющем большинстве докладов того же семинара анализ линейности или нелинейности процессов в строгих рамках термодинамики отсутствовал. Можно констатировать, вслед за Ю.М. Пушаровским, что в геонауках идет процесс становления новой нелинейной парадигмы, но процесс этот находится пока еще в стадии начального нелинейного осмысления. Процесс проникновения и закрепления синергетических представлений будет, видимо, играть роль одного из определяющих в развитии наук о Земле в XXI в. В связи с этим и с учетом отставания аксиоматики и методологии наук о Земле от современной естественно-научной картины мира становится очевидной важность внедрения уже достигнутых успехов и нелинейного мышления в целом не только в геонаучные исследования, но и в геонаучное образование и производственную сферу.



Юрий Михайлович Пушаровский (род. 31.12.1916) — выдающийся российский геолог, академик РАН. Ветеран Великой Отечественной войны.

Автор фундаментальных работ по тектонике, региональной геологии, геологии океанов и морей, геодинамике. Автор и редактор ряда широко известных тектонических карт.

Синтез новейших данных по геологии, геофизике, экспериментальной минералогии и сейсмотомографии позволил ему создать новую модель строения Земли, отличающуюся более детальным ее расчленением. Выделенные мантийные геосферы представляют собой тектонически активные оболочки. Тем самым доказывается,

что тектоносфера Земли простирается вплоть до ее ядра. Ю.М. Пушаровский — один из основоположников таких новых научных направлений, как нелинейная геодинамика и нелинейная тектоника.

Сегодня имеются примеры достаточно глубоких разработок в том числе с построением моделей особенно в наиболее математизированной области наук о Земле — геофизике (например, нелинейная сейсморазведка). Однако такое наблюдается и по классическим геологическим направлениям. Например, детальное изучение структуры доннейит-маккельвиитовой минеральной ассоциации в сравнении с салфеткой Серпиньского, подробно проанализированное математически (Яковенчук и др., 1996), можно в определенной мере рассматривать как достижение минералогического направления. В области рудной геологии группой исследователей под руководством П.М. Горяинова успешно разрабатывается новая нелинейная модель формирования и эволюции железистых формаций (Базай, Иванюк, 1996; Горяинов, 1989; Горяинов и др., 1992, 1997; Горяинов, Иванюк, 2001 и др.). Обозначилось новое научное направление — «нелинейная металлогения» (Щеглов, Говоров, 1985 и др.).

В первом десятилетии XXI в. интерес в науках о Земле к синергетике продолжает взрывообразно усиливаться, о чем свидетельствует обсуждение проблем нелинейной тематики на множестве геонаучных мероприятий всех уровней. Для нового этапа характерны следующие основные особенности.

1. Попытки непосредственного сотрудничества специалистов геологов, географов, геофизиков, геоэкологов и т.д. со специалистами в области нелинейной динамики, развитие специальных подразделений в академических институтах и вузах.

2. Непосредственное нелинейное моделирование геосистем и геопроцессов разных уровней. Рассуждая о глобальных геосистемах и геопроцессах, нужно признать, что на сегодняшний день трудно говорить о законченных строгих математических моделях. Скорее пока воплощается этап качественного моделирования и нелинейного осмысления, а также выявляются конкретные нелинейно динамические закономерности и разрабатываются отдельные элементы будущих моделей.

3. Налицо повышенный интерес именно к синергетике глобальных геопроцессов, что показывает количество публикаций на эту тему и специальных научных мероприятий. Примерами могут служить всероссийские семинары по нелинейной геодинамике (Вопросы..., 1998 и др.), конференции по геологической синергетике (Геологическая синергетика, 1991; Теория..., 1998 и др.), Международный семинар «Самоорганизованная критичность в природной среде и ее космический мониторинг» в Институте гео-

графии РАН, а также организованные авторами книги Всероссийский симпозиум «Проблемы синергетики и коэволюции геосфер» (2008), Всероссийская научная школа «Нелинейные феномены, хаос, критические явления и методы их исследования с помощью вейвлетного, кластерного и спектрального анализа в геоэкологических процессах» (Нелинейные..., 2009; Егоров и др., 2010), Всероссийская научная конференция «Коэволюция геосфер: от ядра до Космоса» (2012) и др.

2.2. Физика, синергетика и науки о Земле

На первый взгляд, их взаимоотношения достаточно гармоничны, ибо давно развивается мощное междисциплинарное направление — геофизика (физика Земли). Но при более подробном рассмотрении в истории взаимодействия этих естественных наук видно, что простота ситуации — кажущаяся. У. Кэри, критически коснувшись этого вопроса, в частности, заметил: «Физики вечно осмеивали геологию как субъективный, неточный, описательный предмет, который нельзя даже сравнивать с точными науками. “Геологи, — насмеялись они, — при первом появлении знака интеграла ищут, куда бы спрятаться”. Кельвин говорил, что геология без чисел — не наука. Однако в случае самого Кельвина ярко высвечивается ахиллесова пята физики — уязвимость ее предпосылок, ничуть не лучших, чем постулаты безусловной веры. Изящные числа Кельвина дали ответы настолько же неверные, насколько они не были окончательными. И такой была судьба физики на протяжении всей истории» (Кэри, 1991).

Говоря о единстве и различиях геологического и геофизического подходов в изучении Земли, У. Кэри заключил, что геологи и геофизики «приближаются к истине с разных сторон. Геофизики рассматривают какой-то аспект строения Земли, создавая теоретическую математическую модель, которая ограничивает число переменных и поддающихся количественной оценке параметров. Вывод может быть справедлив для этой модели, но он будет иметь малое отношение (или вовсе никакого) к реальной Земле, хотя геофизик будет твердо в него верить, особенно если он выдан беспристрастным компьютером. Геолог, напротив, имеет дело с реальной Землей, видит ее без прикрас и рассуждает качественно и логично. Для геофизика опасность заключается в несовершенстве модели. Ахиллесова пята геолога — возможная неправильность его интуиции. Нельзя быть уверенным ни в том, что все относя-

щиеся к делу законы природы уже открыты, ни в том, что не будет перейден какой-то порог, когда изменение количества создаст новое качество» (Кэри, 1991).

Некоторые авторы оценивают взаимоотношения физики и наук о Земле, характеризуя их на некоторых этапах как противостояние. У. Бэчер из Колумбийского университета США выделил 70-е гг. XX в. как этап «третьего противостояния». «Имелось в виду противостояние физики и геологии в изучении нашей планеты. Первое такое противостояние началось более века назад, когда физик лорд Кельвин подсчитал: если Земля первоначально была раскаленным шаром, она должна была остывать 20 млн лет. Геологи засомневались. Ничего определенного они сказать не могли, но интуитивно чувствовали, что их палеонтологические данные — данные о накоплении осадков в земных слоях — противоречат жестким возрастным рамкам, отведенным для Земли физиками. Несколько десятилетий физический и геологический подходы к изучению Земли развивались параллельно, и противостояние становилось все более острым. Ученым не хватало точных методов измерения геологического времени. Они могли только определять относительное время — положение слоев по остаткам ископаемых животных. А завершилось первое противостояние взрывом, скачком. В 1905 г. первые в истории измерения абсолютного возраста горных пород по накоплению в них продуктов радиоактивного распада показали, что счет годам Земли следует вести на миллиарды. Геологи с их столь архаичным методом измерения, как интуиция, оказались тогда ближе к цели развития науки — истине, чем физики с их точными, но опирающимися в данном случае на неверные посылки расчетами.

Альфред Лотар Вегенер (1880–1930) — немецкий геофизик, профессор Гамбургского университета и университета в Граце (1924). Участник (1906–1908, 1912–1913) и руководитель (1929–1930) экспедиций по исследованию Гренландии. Последняя экспедиция была предпринята для организации в центре Гренландии круглогодичной исследовательской станции «Айсмитте» на высоте около 3000 м. Возвращаясь из этой экспедиции, погиб во льдах. Основные научные труды — по термодинамике



атмосферы и палеоклиматологии. Автор концепции дрейфа материков — первой концепции мобилизма, являющейся основой (в рамках современной глобальной теории тектоники плит) для историко-биогеографических и палеобиогеографических реконструкций.

В науках о Земле стало устанавливаться нечто вроде идиллии. Радиоактивность, позволившая определить возраст Земли, пригодилась и для другого: она объяснила, почему в недрах нашей планеты тепло и даже жарко... Но благополучие было недолгим. Второе противостояние началось в 1915 г., когда вышла книга А. Вегенера «Происхождение материков и океанов» (Wegener, 1915). Книга немецкого геофизика взволновала многих, несмотря на тяжелые времена: шла война. А. Вегенер подверг сомнению господствовавшие прежде взгляды о единообразии земной коры под океанами и континентами. В противовес великому австрийскому геологу Э. Зюссу, Ньютону геологии, который считал, что океаны — это те же материки, только «утонувшие», А. Вегенер доказывал, что кора под океаном и сушей принципиально различна. А. Вегенер пользовался еще очень неполными, противоречивыми данными нового физического метода исследования — измерениями силы тяжести. Самое поразительное: материки у Вегенера двигались! После первого ошеломления многие геологи восторженно отнеслись к революционным идеям талантливого немецкого ученого. Особенно горячо откликнулись довоенные советские геологи. Ученые с надеждой обратили взоры к геофизикам: те должны были решить и рассчитать, возможен ли такой процесс — плавание твердых континентов по твердой же (это уже было тогда известно) мантии Земли (Гангнус, 2006). В результате своих рассуждений А. Гангнус приходит к выводу: «Физики обычно мало интересуются геологией, а геологи плохо знают физику. Это положение начало меняться только в последнее время» (Гангнус, 2006).

Отметим (справедливости ради и в дополнение У. Кэри — см. выше), что геология в свою очередь тоже «способна испугать». Об этом высказывался в своей автобиографии Ч. Дарвин. «Ничто не может показаться с первого взгляда более безнадежным, как хаос, представляемый геологическим строением совершенно новой местности. Но, мало-помалу изучая во многих местностях напластование и природу горных пород и ископаемых, постоянно сличая, рассуждая и пытаясь предсказать, чего следует ожидать далее, начинаешь усматривать проблески света и, наконец, более или менее выясняешь себе строение всей исследуемой области. Я взял с собой первый том “Основ геологии” Ляйеля, который

тщательно изучил; книга эта оказала мне большую пользу и не в одном только отношении» (Дарвин, 1952). Нечто подобное можно сказать, наверное, о любых разобщенных научных направлениях и их сложно переплетенных современных взаимоотношениях. Это лишь подчеркивает огромную положительную роль взаимодействия и взаимного идейного обогащения наук (Иванов, 2007 и др.).

Интересен в свете обсуждаемого вопроса исторический путь также такого мощного направления наук о Земле, как физическая география, которое фактически «оформилось от физики» (Исаченко, 1975). «В университетах до 1935 г. география существовала при словесных или историко-филологических факультетах, но в 1935 г. она была разделена: “статистика” объединялась с политической экономией, а физическая география — с физикой, причем последнюю читали и практически разрабатывали физики (среди них Э.Х. Ленц — в Петербургском университете, М.Ф. Спасский — в Московском). Профессор физики Московского университета И.А. Двигубский еще в 1814 г. писал, что физическая география — это часть физики. “Физический уклон” имели учебники физической географии А. Стойковича (1813) и Г. Петровского (1847). Следовательно, объединение физической географии с физикой не было случайным; как заметил Н.А. Солнцев в 1955 году, оно было “не только законно и логично, но оно сыграло положительную роль в становлении физической географии как науки”» (Исаченко, 1975).

Физика в первой половине прошлого века была наиболее разработанной отраслью естествознания, и благодаря физикам физическая география «вместо перепевов с чужих слов была впервые приобщена к настоящей науке с ее наблюдениями природных явлений, экспериментированием, применением рабочих гипотез и, наконец, с разработкой вполне законченных и обоснованных теорий». «...Зависимость физической географии от физики, плодотворная на известном этапе, с течением времени превратилась в тормоз на пути ее развития. Прогресс других отраслей естествознания, в особенности биологии, не находил своего отражения в физической географии. Физики придали ей одностороннее направление. ... С 1863 г. в российских университетах предусматривалось создание самостоятельных кафедр физической географии (на физико-математических факультетах), но многие из них оставались незамещенными из-за отсутствия соответствующих специалистов. Нельзя, конечно, сказать, что развитие физической географии после этого вовсе прекратилось, но оно происходило за пределами университетов» (Исаченко, 1975).

Л.С. Берг также считал, что название «география» должно быть удержано только за учением о ландшафтах. Что же касается физической географии, то она «занимается изучением процессов, происходящих в воздухе, воде и земной коре, а также форм земной поверхности и составляет одну из ветвей космической физики» (Берг, 1921). В связи со сказанным интересна монография В.И. Чупрынина (Чупрынин, 2008), представляющая собой введение в нелинейный мир географии: «Именно нелинейность создает богатую и разнообразную картину окружающего нас географического пространства» (с. 71).

Определенная аналогия прослеживается с подготовкой специалистов-геофизиков. Они готовились на физических и физико-математических факультетах. Сегодня это происходит, как правило, лишь в тех университетах, где отсутствуют геологические факультеты. Реально междисциплинарные направления часто закрепляются в тех науках, с которыми связано их практическое приложение. Одним из примеров может служить палеонтология, которая, развиваясь на поле биологии и геологии, как правило, сосредоточивается на соответствующих кафедрах геологических факультетов.

2.3. Нелинейные эффекты в рельефе Земли

В геоморфологии наблюдается множество структур и форм, образование которых явно связано с нелинейностью (Поздняков, Черванев, 1990; Чупрынин, 2008 и др.). Нелинейные процессы, вероятно, способствуют возникновению троговых долин, содержащих чередующиеся бассейны и ригели (Маза, 1989; Mazo, 1989), рельефообразованию в условиях пустынь (Федорович, 1983) и т.д. Примерами возникновения пространственных ритмических структур, относящихся к диссипативным, являются разномасштабные проявления на поверхности Земли конвективных структур (Чупрынин, 1985). Интенсивно изучаются фрактальные свойства овражно-балочных сетей и речных бассейнов (Васильев, 1987; Иванов и др., 2006; Пузаченко, 1997; Яшков, Иванов, 2007; Barbera, Rosso, 1989; Claps, Oliveto, 1996; Lopes et al., 2002; McNamara, et al., 1999). Другим примером может служить неравномерное расселение людей по поверхности Земли, связанное с особенностями рельефа и приобретающее «...ячеистую, мозаичную структуру, подобную ячейкам Бенара в теории конвекции» (Моис-

сеев, 2000, стр. 50), а также возникновение и развитие сети населенных пунктов и др. (Глобальные..., 2012; Чупрынин, 2008).

Для структур рельефа Земли в локальном и глобальном масштабах характерна самоорганизация, связанная с процессами возникновения новых макроструктур в геосистемах, отмирания зрелых структур и т.п. А.Д. Арманд (Арманд, 1988а, с. 54) рассматривает самоорганизацию как процесс отбора устойчивых вариантов из многообразия структур, созданного шумом. Составляющими процесса самоорганизации являются такие явления, как формирование вариантов, конкуренция и отбор, а при определенных условиях — еще и кооперация, и когерентность. Все диссипативные структуры (Гленсдорф, Пригожин, 1973; Николис, Пригожин, 1979, 1990; Эбелинг, 1979) являются результатом самоорганизации. Именно как самоорганизующиеся многими исследователями рассматриваются ландшафты и геосистемы в целом (Арманд, 1988а, б; Перельман, 1995).

Примерами, в которых роль нелинейности является определяющей, могут быть возникающие в результате самоорганизации разнообразные регулярные структуры: «кающиеся» снега и льды (Котляков, Лебедева, 1975), системы прибрежных разрывных течений (Басков, 1966), продольная периодичность троговых долин (Мазо, 1989) (рис. 2.3), регулярность в расположении речных бассейнов, вулканов и вулканических островов, грядово-мочажинные или грядово-озерковые комплексы (Свирижев, 1987) и, вероятно, сеть поселений, но, как отмечает В.И. Чупрынин, этот пример с нелинейной точки зрения никто не анализировал (Чупрынин, 2008). Сведения о конвективных диссипативных структурах, являющихся основой для многих пространственных, географических образований, представлены В.И. Чупрыниным (1997). Имеются примеры диссипативных геоморфологических структур (Поздняков,



Рис. 2.3. Троговая долина — пример экзарационной деятельности ледника и продукт нелинейных геопроцессов (Горный Алтай, 2009. Фото И.А. Яшкова)

Черванев, 1990). К нелинейным пространственным структурам можно отнести еще некоторые переходы в пространстве, в формировании которых существенную роль играет нелинейность. Некоторые из них рассмотрены в ряде работ (см., например, Экосистемы..., 1989).

Известны многие геопроцессы, в которых могут возникать автоколебания (Бутенин и др., 1976; Васильев и др., 1987; Заславский, 1984; Заславский, Сагдеев, 1988; Кадомцев, Карпман, 1971; Кадомцев, Рыдник, 1981; Трубецков, 2003; Чупрынин, 2008): ветровые пульсации на поверхности воды (Кравцов, Эткин, 1983); оползневые пульсации на подводных склонах (Акивис, Девдариани, 1982; Девдариани, Питовранов, 1981; Лукьянов и др., 1982, 1984), возникающие вследствие седиментации; колебания, обнаруженные в моделях атмосферы (Гусев, Касьянов, 1984; Касьянов, 1984; Чупрынин, 1976; Шулейкин, 1968) и океана (Каган и др., 1991; Сеидов, 1989а); колебания при взаимодействии океана с атмосферой (Баталин и др., 1974; Волков, 1980; Даричева и др., 1972; Даричева, Чупрынин, 1974, 1983; Дуванин, 1968, 1977); хаотические автоколебания гидросферы и климата (Найденев, Кожевникова, 2002); глобальные климатические колебания в системе ледники-океан-атмосфера-суша (Вербицкий, Чаликов, 1986; Сергин, Сергин, 1978; Сорохтин, 2006); автоколебательный характер раздвижения литосферных плит (Жемчужников, 1993). Теоретически установлена возможность автоколебаний в недрах Земли (Лукьянов, 1985, 1987; Тихонов и др., 1969, 1972; и др.) и звезд (Жевакин, 1970). Имеются примеры автоколебаний в географических системах (Арманд, Ведюшкин, 1989; Арманд, Кайданова, 1999; Чупрынин, 1976, 1980, 1985, 2004; Чупрынин, Даричева, 1978), лесной растительности (Джансеитов и др., 1976; Спокойнов, 1984; Суханов, 1990), геоморфологических системах (Самоорганизация..., 2003). Исследованы разнообразные автоколебательные процессы, в том числе и хаотические, в экосистемах (Свирижев, 1987).

В.И. Чупрынин (2008) обращает особое внимание на очевидный геолого-геоморфологический автоколебательный процесс, который действует на значительной части территории Земли. Вследствие неравномерных по пространству эндогенных тектонических процессов внутри Земли в одних областях пространства поверхность Земли приподнимается (процесс горообразования), а в других опускается. Эти процессы создают горизонтальные градиенты рельефа на поверхности Земли. В результате рельеф пере-

ходит в неравновесное состояние. Одновременно за счет выветривания и сноса материала по склонам идет процесс выравнивания рельефа (ликвидации этой неравновесности). Он описывается нелинейным уравнением (Поздняков, 2003б), отражающим закон сохранения вещества:

$$gh(x, t)/gt = Q(h, x, t) - G(h, u, x, t), \quad (2.1)$$

а также уравнением, описывающим скорость сноса вещества вниз:

$$gh(x, t)/gt = F[u(x, t), h(x, t)], \quad (2.2)$$

где h — высота рельефа; x — горизонтальная координата; u — скорость перемещения вещества по склону вниз; Q — скорость поступления вещества к поверхности при эндогенных процессах; G пропорциональна u , которая в свою очередь зависит от уклона поверхности α , по которой движется вещество, и от свойств вещества. Упрощенная модель для описания таких процессов должна записываться в виде двух дифференциальных уравнений типа (2.2), но с учетом дополнительных членов с частными производными по x , которые должны описывать пространственную неоднородность распределения вещества вдоль склона. При небольших значениях Q осуществляется пропорциональный h непрерывный перенос вещества вниз по склону, и система постепенно выходит на уровень насыщения (возникновения так называемого текущего равновесия), в результате которого устанавливается стационарный режим (возникновение эндогенно обусловленных горизонтальных градиентов рельефа компенсируется экзогенными процессами).

Но при больших значениях Q непрерывный снос вещества (условно назовем его ламинарным) вниз может оказаться слишком слабым, скорость u мала для компенсации притока вещества Q . Тогда величина h начинает расти (стадия накопления) до некоторого критического значения уровня неравновесности, после которого динамика системы принципиально меняется. Затем происходит быстрый (турбулентный) сброс вещества (обвал (рис. 2.4), оползень). Если уровень неравновесности за счет эндогенных процессов восстанавливается, то ситуация с накоплением и сбросом повторяется. Автоколебания здесь возникают только при определенных условиях, связанных со значением величин Q , α , критическим значением и распределением массы накопленного вещества вдоль склона $h(x)$ (Чупрынин, 2008).



Рис. 2.4. Результат обвала как нелинейного процесса быстрого (турбулентного) сброса вещества (Саратовское Поволжье, фото А.В. Иванова)

«Автоколебания при действии склоновых процессов — широко распространенный процесс. В общем виде примерно такую же модель можно сформулировать для многих склоновых процессов, в частности, снежных лавин, пульсаций горных ледников, уже упоминавшихся оползней на подводных склонах (Чупрынин, 1985). Но в этих процессах накапливается уже другое вещество (снежные или выносимые реками твердые осадки), и неравновесность возникает не за счет процессов, происходящих внутри Земли, а за счет других источников вещества» (Чупрынин, 2008) (рис. 2.5).

Особо интересна проблема переходных процессов в системах рельефа Земли. «Наблюдения показывают, что в природе и обществе выделяются два вида изменений во времени переменных, характеризующих динамику систем: медленное и быстрое, часто резкое, скачкообразное. Причем характерные скорости таких изменений (движений) и могут различаться на один, два порядка и более, хотя иногда они могут быть сравнимыми (но при этом в качественном отношении характеристика движений резко меняется). Такие два вида движения отмечаются во многих работах как

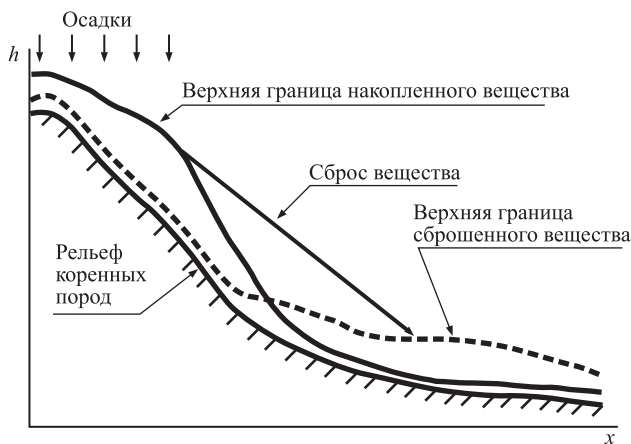


Рис. 2.5. Схема нелинейного геопроцесса накопления и сброса вещества на склоне (Чупрынин, 2008)

чередование в истории различных объектов длительных периодов относительно медленной эволюции с кратковременными эпохами быстрых изменений (Арманд и др., 1999). Имеется множество примеров, фиксируемых в различных разделах наук о Земле, в том числе и географии. Быстрый вид движения часто можно трактовать как переходный процесс. Определим переходный процесс как процесс перехода динамической системы из начального неустойчивого состояния в устойчивое. В географических системах фактически любое из этих состояний, как и переход, являются неравновесными. Следовательно, для географических систем переходный процесс можно определить как процесс перехода динамической системы из неустойчивого неравновесного состояния в устойчивое неравновесное состояние. Для возникновения такого процесса необходимо, чтобы система каким-то образом была выведена в неустойчивое состояние. Исследования последних двух десятилетий (Арманд и др., 1999, Экосистемы..., 1989) показывают, что при изучении эволюции, динамики географических объектов следует выделить самостоятельную проблему — исследование переходных процессов. В целом проблема их исследования в географии основательно не рассмотрена да и не сформулирована достаточно четко» (Чупрынин, 2008).

Переходные процессы, возникающие в географических системах, очень сложны и слабо предсказуемы, так как эти системы (в отличие от гидродинамических) обычно содержат множество компонент различной природы. Фактически география неявно

уже давно занимается такими процессами. Например, изучается реакция географических объектов на разнообразные катастрофические события, связанные с внешними факторами (геосистем и экосистем на антропогенные воздействия, ландшафтов на вулканические извержения, растительности на выпас, подтопление или осушение (Экосистемы..., 1989)), а также быстрая реакция на медленные однонаправленные вековые изменения климата, возрастающие объемы отходов деятельности человека и т.д. В рамках исследования переходных процессов можно изучать сукцессии, реакцию вечной мерзлоты на антропогенные воздействия, засухи или наводнения, возможные климатические и другие изменения на планете после глобальных катастроф (например, ядерной войны), а также экономико-географические и демографические переходы (Чупрынин, 2008).

Вопросам возникновения пространственного порядка, регулярных, пространственно-периодических, ритмических структур в геосистемах посвящены ряд работ (см., например, Арманд, 1988а; Зимов, 1993; Летников, 1990; Степанов, 1986; Федер, 1991; Чупрынин, 1997; 1998; Шафрановский, 1985; Шолпо, 1986; Щукин, 1960), но исследования регулярных структур, синтезирующие, систематизирующие данные всех наук о Земле, на сегодняшний день фактически отсутствуют.

2.4. Нелинейные подходы к построению геофизической модели геологической среды

В современной геофизике одной из наиболее сложных и актуальных проблем при построении физико-математических моделей является именно нелинейность многих геологических процессов. При изучении таких процессов и явлений традиционное линейное моделирование оказывается недостаточным, а иногда приводит к решениям, физическая интерпретация которых затруднена или невозможна. Часто эти решения просто неправильно описывают процесс или явление. В связи с выявленным многообразием нелинейных эффектов и их взаимосвязью постепенно очерчивается новое научное направление — нелинейная геофизика, объектом изучения которой и являются нелинейные геофизические эффекты и связанные с ними геологические процессы.

Нелинейные явления в геофизике имеют место на всех уровнях, начиная от общепланетарного (например, конвективные процес-

сы в мантии или генерация магнитного поля Земли) и заканчивая масштабами отдельных пор горной породы (например, явление изменения коэффициентов тепломассопереноса в пористой среде при воздействии звукового поля). Основными физическими факторами, приводящими к широкому распространению нелинейных явлений в геофизике на общегеологическом уровне, по О.Л. Кузнецову (Кузнецов, 1993), являются: 1 — огромные энергии (например, отдача тепловой энергии за год в масштабах всей Земли составляет $6,5 \cdot 10^{27}$ эрг; энергия, высвобождающаяся при сейсмической и вулканической деятельности — 10^{25} – 10^{26} эрг; 2 — глобальные пространственные (порядка размеров земного шара или крупных регионов) и временные интервалы (10^8 – 10^9 лет).

За основу выделения уровней в иерархии нелинейных геофизических процессов и явлений вслед за О.Л. Кузнецовым используем масштабность, принятую в геологии (табл. 2.1). Так как в движение вещества Земли вовлечена по крайней мере вся мантия, главным масштабом можно считать радиус земного шара, что соответствует уровню глобальных геодинамических явлений.

Нелинейность геологических процессов определяется двумя фундаментальными свойствами геологической среды (горных пород):

- наличием определенных предельных состояний, в которых отклик среды на действующий фактор перестает определяться линейной зависимостью и становится существенно нелинейным, а сама среда переходит в новое качественное состояние (температуры фазовых переходов, пределы упругости, прочности, пластичности и пр.);
- способностью геологической среды сохранять старое качество за пределом, соответствующим равновесию между старым и новым состоянием («запредельное терпение»), т. е. способностью находиться в метастабильном состоянии.

Нелинейная геофизика началась с новых представлений о среде. Трудami М.А. Садовского и его школы в 1980-е гг. было сформулировано понятие геофизической среды (Дискретные..., 1989; Проблемы..., 1987; Садовский, 1985, 2004; Садовский, Писаренко, 1989, 1991 и др.), лежащее в основе нелинейной геофизики и, в частности, нелинейной сейсмологии. До этого теоретической основой сейсмологии и сейсморазведки было учение о механике сплошной среды — упругой, пассивной, реагирующей на внешние воздействия при условии их малости и кратковременности в соответствии с законом Гука. Главная особенность такой среды —

Таблица 2.1
Основные геофизические нелинейные и сопровождающие их линейные процессы и явления (Кузнецов, 1993)

Эффект	Сущность проявления	Источник энергии	Характерные пространственный (R) и временной (T) масштабы эффекта	Пути использования
<i>Нелинейные эффекты</i>				
Конвекция в мантии	Возникновение конвективных потоков в мантии Земли, возникновение так называемых горячих точек	Гравитационная дифференциация вещества Земли, распад радиоактивных элементов ($6 \cdot 10^{27}$ эрг/год)	T 10^8 лет R 10 000 км (глобальный масштаб)	Анализ истории Земли, прогноз глобальных явлений, прогноз сейсмических опасностей регионов
Магнетизм Земли	Возникновение магнитного поля Земли	Движение жидкой оболочки ядра	T 10^5 лет R 10 000 км (глобальный масштаб)	Анализ истории Земли, возникновение магнитного поля Земли
Взаимодействие литосферных плит	Образование континентов, океанов, крупных разломов, горных стран, островных дуг	Движение мантийного вещества	T (1-2) 10^8 лет R 10 000 км (глобальный масштаб)	Анализ истории Земли, прогноз глобальных явлений, прогноз сейсмической опасности регионов
Взаимодействие и динамика микроплит	Внутриплитные землетрясения, возникновение крупномасштабных кольцевых структур и др.	Движение мантийного вещества, движение гигантских отделностей Земной коры — «литосферных плит»	R 100—1000 км (мезомасштаб)	Прогноз землетрясений, геологическая история регионов, поиск и разведка месторождений
Динамика напряженного состояния	Образование зон аномального горного давления, образование разломов и др.	То же	Мезомасштаб	То же

Изменение фазового состояния в сильных акустических полях	Выделение газа, разложение газогидратов и др.	Искусственный источник землетрясений	Микромасштаб	Разведка месторождений ряда полезных ископаемых, в том числе нефти и газа. Разложение гидратов и др.
Изменение коэффициентов теплоемкости, теплопроводности, проницаемости в полях с интенсивностью больше $0,1 \text{ Вт/см}^2$	Изменение коэффициентов диффузии, теплопроводности, проницаемости в полях с интенсивностью больше $0,1 \text{ Вт/см}^2$	То же	То же	То же; кроме того интенсификация притоков нефти и др.
<i>Линейные эффекты, сопутствующие нелинейным</i>				
Формирование теплового потока Земли, возникновение крупномасштабных аномалий гравитационного, магнитного и тепловото полей	Отклонения величин физических полей от средних по земному шару	Гравитационная дифференциация вещества; радиоактивный распад; движение мантийного вещества	Глобальный масштаб	Теория фигуры Земли; прогноз глобальных явлений, прогноз сейсмичности
Связь динамики напряженного состояния с размещением месторождений полезных ископаемых	Зависимость размещения месторождений полезных ископаемых от эволюции земной коры	Движение мантийного вещества, движение блоков земной коры	Мезомасштаб	Разработка методов прямого поиска месторождений полезных ископаемых

Окончание табл. 2.1

Эффект	Сущность проявления	Источник энергии	Характерные пространственный (R) и временной (T) масштабы эффекта	Пути использования
Землетрясение, вулканическая деятельность	Импульсное перераспределение энергии и массы в земной коре и верхней мантии	То же	То же	Прогноз сейсмичности в вулканической деятельности
Влияние сейсмических полей на формирование и размещение полезных ископаемых	Влияние сейсмичности на тепломассоперенос вещества и, следовательно, на размещение месторождений	То же	То же	Разработка методов прямого поиска месторождений полезных ископаемых
Механические реакции, возникающие под действием стационарных и переменных напряжений	Возникновение специфических химико-физических условий в пористых и кристаллических телах под действием механических напряжений	Движение мантийного вещества; движение блоков земной коры	Микромасштаб	То же

уменьшение амплитуды колебания с удалением от источника вследствие геометрического расхождения волнового фронта.

Идея сейсморазведки применительно к такой модели выглядит следующим образом (рис. 2.6). Возбуждаемые искусственным землетрясением (взрывом, вибровоздействием, пневматическим излучателем) упругие волны достигают границ раздела толщ с различными акустическими жесткостями (рис. 2.6, *а, б*). На этих границах происходит отражение и преломление, и таким образом энергия падающей волны (P_1) перераспределяется между четырьмя вторичными волнами: двумя отраженными P_{11} и P_1S_1 и двумя преломленными волнами P_{12} и P_1S_2 . Волны P_{11} и P_{12} являются монотипными, т.е. остаются продольными, а P_1S_1 и P_1S_2 — обменными, т.е. после встречи с границами распространяются далее, меняя свой тип, и становятся поперечными. Интенсивность вторичных волн определяется соотношением скоростей их распространения и углами падения отражения и преломления (рис. 2.6, *в*) в соответствии с законом Снеллиуса:

$$\frac{\sin i_P}{V_P} = \frac{\sin i_{P_{11}}}{V_{P_{11}}} = \frac{\sin i_{P_{1S_1}}}{V_{S_1}} = \frac{\sin i_{P_{12}}}{V_{P_{12}}} = \frac{\sin i_{P_{1S_2}}}{V_{S_2}} = \frac{1}{V^*} \quad (2.3)$$

где V^* — кажущаяся скорость, определяемая соотношением $V^* = V/\sin i$, причем i — угол подхода вторичной волны к поверхности наблюдения. Это обстоятельство также проявляется в уменьшении интенсивности вторичных волн, и запись колебаний, осуществляемая сейсмоприемником, может выглядеть так, как это показано на рис. 2.6, *в*. Одновременно амплитуда колебаний уменьшается за счет неупругого поглощения энергии волн, причем это поглощение идет избирательно — геологическая среда «работает» как фильтр нижних частот, гася высокочастотные компоненты спектра. Так, на некотором удалении l от источника колебаний амплитуда U_1 в сравнении с начальной U_0 составляет $U_1 = U_0 e^{-\alpha l}$, где коэффициент поглощения α в большинстве случаев прямо пропорционален частоте $\alpha = \delta f$ (где δ — коэффициент пропорциональности).

В результате форма сейсмического импульса радикально меняется — амплитуды уменьшаются, сигнал растягивается, энергия волны «перекачивается» в хвостовые фазы (рис. 2.6, *з, д*), сигнал растягивается и видоизменяется. Сама среда, как видно из приведенных рассуждений и рисунков, принимает только пассивное участие в формировании волнового поля, не привнося в него ка-

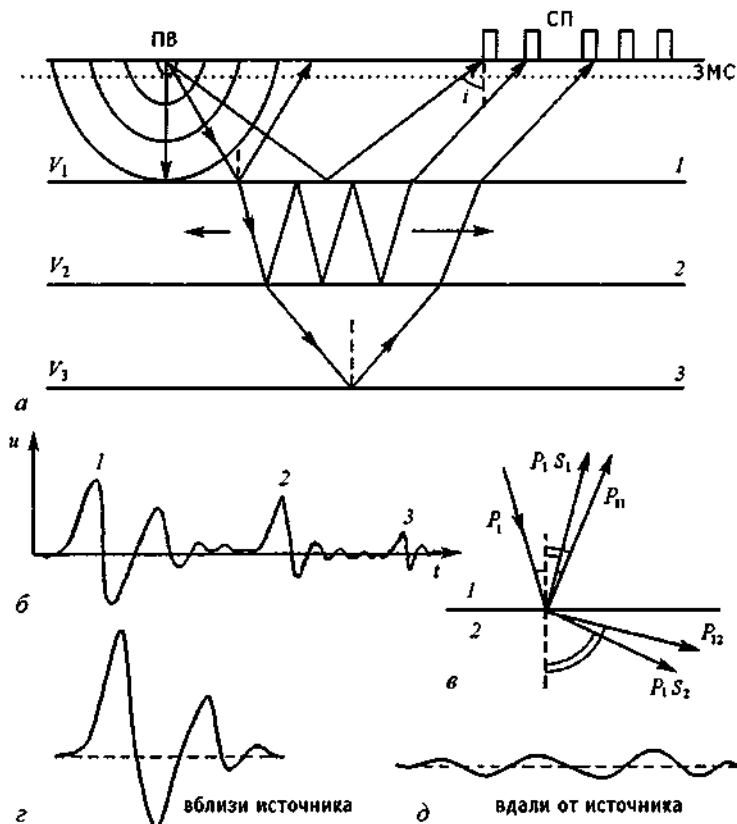


Рис. 2.6. Нелинейная модель геологической среды в сейсморазведке:

a — схема возбуждения и регистрации сейсмических волн; ПВ — пункт возбуждения, СП — сейсмоприемник, ЗМС — приповерхностная зона малых скоростей, V_i — пластовые скорости упругих волн, цифрами пронумерованы пласты и поверхности раздела, в слое 2 показана только одна многократно отраженная волна; *б* — запись отраженных волн сейсмоприемником, индексы 1, 2, 3 соответствуют номерам границ, от которых отразилась земная волна; *в* — образование вторичных моноптипных и обменных волн, P — продольная волна, S — поперечная; *г*, *д* — деформация сейсмического импульса в модели сплошной упругой среды (Рыскин, Иванов, 2003)

ких-либо новых колебаний за счет собственного энергетического ресурса. Регистрация отраженных и преломленных волн осуществляется в присутствии различного рода помех, например кратных отражений, лишь отчасти устранимых в процессе компьютерной обработки записей. Это приводит к большим трудностям интерпретации полезных волн, особенно в части прогнозирования вещественного состава пород (литологии) и их нефтенасыщенности,

так как литологическая и флюидальная (содержание нефти, газа, воды в составе флюида) характеристики разреза определяются в первую очередь динамическими (амплитудными и частотными) особенностями записей, сильно искаженными действием указанных причин. Отмеченные трудности усугубляются в рамках этой «старой модели» тем, что породы не обладают собственной энергией и не могут накапливать ее при геодинамических процессах, постоянно идущих в недрах Земли.

Нелинейную модель геофизической среды легче всего представить, если вообразить, что хотя бы одно землетрясение уже когда-то произошло и речь идет о повторном возбуждении колебаний. Монолитность среды уже нарушена, есть трещины и микротрещины, есть куски, отдельные флюиды, заполняющие эти трещины и все пустотное пространство породы — поры, содержащие газовую и жидкую фазу. Таким образом, новая модель представляет собой сложную систему, состоящую из блоков различных размеров, подчиняющуюся определенной последовательности. Система открыта, как и составляющие ее отдельные, для энергообмена с окружающей средой. Блоки в системе отделены друг от друга прослойками, сложенными из блоков разных размеров меньшего масштаба. Эта открытая система квазистационарна — в ней идут процессы перераспределения и трансформации энергии (и массы), поступающей извне. Она гетерогенна, энергонасыщенна и фрактальна (с элементами самоподобия упомянутых блоков). Она способна накапливать эту энергию и сохранять в себе некоторое ее количество (в том числе энергию упругих деформаций) в скрытом состоянии и после устранения непосредственных источников, бывших причиной ее появления. Энергонасыщенность проявляется в виде постоянно действующей сейсмической и акустической эмиссии, причем каждая среда «звучит» по-своему.

Распространение волн в такой среде характеризуется рядом особенностей: во-первых, низкочастотные сигналы могут вызывать высокочастотный отклик — расширение спектра идет в обе стороны, и форма записи может оказаться вовсе не такой, как показано на рис. 2.6, z , d ; во-вторых, слабый сигнал может вызвать сильный отклик; в-третьих, при взаимодействии гармонических волн появляются волны новых частот, кратных основным гармоникам — суммарным и разностным; в-четвертых, скорость волн зависит от амплитуды воздействия.

В спокойном состоянии, без «накачки», энергия внутренних напряжений находится в равновесном состоянии до достижения

определенного уровня. При дополнительном возбуждении (воздействии внешним физическим полем) может произойти высвобождение накопленной энергии, которая, в том числе и в виде упругого поля, приводит к появлению колебаний, характеристики которых определяются физико-химическими свойствами среды (тела). Если выделить эти колебания из общего волнового поля, то можно повысить достоверность прогноза залежей углеводородов. Особенно усиливается энергия излучения сейсмических колебаний после достаточно длительного (20–30 мин.) вибровоздействия на среду — она становится «преобразователем спектра». Доминантные частоты для гравия 8–11 Гц, песка — до 25 Гц, глин — до 4 Гц, нефтегазонасыщенных пород — 2–4 Гц.

Залежи углеводородов находятся чаще всего в зонах разуплотнения, а физические поля (вибровоздействия) порождают дополнительные разуплотнения, локально понижающие давления. При этом трещины раскрываются, а растворенный в жидкости газ выделяется в виде пузырьков, создавая сложную многофазную систему, отличающуюся запаздыванием во времени на передачу механических напряжений, колебаний и пр. Следовательно, собственные колебания такой системы — низкочастотные и низкоскоростные — в ней возникают, помимо обычных Р и S волн «первого» рода (среднечастных и высокоскоростных), близкие по своему характеру к стоячим Р-волнам «второго рода».

Структурные напряжения (в условиях отклонения объемов среды от равновесного состояния) приводят к деструкции горных пород, а деструкция в свою очередь — к изменению геофизических характеристик среды: уменьшению скорости и увеличению поглощающей способности. Тяготение залежей углеводородов к разломно-трещинным субвертикальным системам (трещинным коллекторам) является причиной возникновения локальных столбообразных зон, наблюдаемых в разных физических полях (магнитном, электрическом, гравитационном, особенно четко — в сейсмическом). В итоге новый образ среды характеризуется активностью, различимостью голоса и тембра звучания разных геологических тел.

На этой основе разрабатывается новая технология *инфразвуковой сейсморазведки*. Первоначально осуществляется регистрация естественного сейсмического фона (до вибровоздействия). При вибровоздействии попутно с отраженными от упоминавшихся границ сигналами, генерированными полем источника, дополнительно возбуждаются сигналы низкочастотного диапазона.

Низкочастотные колебания присутствуют и в поле естественного микросейсмического фона, но после вибровоздействия это поле существенно усиливается. Это происходит потому, что вибровоздействие «провоцирует разрядку» напряженных состояний среды, усиливает энергоотдачу в сторону генерации сейсмических шумов, в том числе и Р-волн «второго рода» (Рыскин, Иванов, 2003).

Обзор состояния нелинейной сейсмологии дан в монографии В.Г. Быкова (Быков, 2000). Им рассмотрены нелинейные волновые процессы на разных структурных уровнях геологических объектов: от взаимодействия отдельных зерен в образцах горных пород до миграции магмы из недр к поверхности Земли и сейсмической активизации разломов земной коры.

2.5. Базовые глобально-геодинамические модели

Механизм геодинамики оболочек планеты и формирования земной коры является дискуссионной проблемой. В настоящее время нет достаточного количества данных для создания обоснованной синтетической теории динамики геосфер и развития Земли. На протяжении истории геологических и геофизических идей сложились несколько геодинамических концепций — представлений о динамике Земли как сложной системы во времени. Все геодинамические модели можно позиционировать в той или иной степени как глобальные нелинейные.

Пульсационная модель базируется на представлениях о двух альтернативных нелинейных глобальных процессах — роста и сжатия планеты. *Гипотеза расширяющейся (растущей) Земли* исторически, по-видимому, является одной из самых первых (обрела концептуальную форму еще в XVIII в. в трудах М.В. Ломоносова и Дж. Геттона). По некоторым данным, за послеледниковое время диаметр Земли мог увеличиться более чем на треть, а площадь поверхности — более чем вдвое. Этой гипотезой удовлетворительно объясняется ряд процессов и явлений в истории Земли, в частности, происхождение океанов как следствие растяжения и растрескивания земной коры. Однако до сих пор не вполне понятны причины столь резкого и значительного увеличения объема планеты. Кроме того, очевидны существенные геофизические и астрономические ограничения, с которыми встречается эта концепция, ибо признание таких изменений основных геофизических параметров планеты, как объем и масса, требует допущения соответствующих изменений других показателей вплоть до орбиталь-

ных параметров небесного тела со всеми логически вытекающими последствиями. Тем не менее, известные данные не исключают возможность дальнейшего развития данной концепции.

Гипотеза контракции (лат. contractio — стягивание, сжатие) по своей сути противоположна предыдущей. Идея появилась в 30-х гг. XIX столетия, гипотеза была сформулирована в 1852 г. Эли де Бомоном (Франция). Согласно известной теории Канта-Лапласа, планета, первоначально находившаяся в расплавленном состоянии, постепенно остывает. Ее объем уменьшается и земная кора «морщится» (в этом случае ее часто сравнивают с кожурой высыхающего яблока) максимально в более пластичных областях, содержащих толщи осадков (так называемых геосинклинальных поясах), сжимаемых более жесткими соседними глыбами (платформами). Такой механизм объясняет охлаждение недр, опускание земной коры, снижение интенсивности вулканической деятельности, непрерывное нарастание осадочного чехла из-за преобладания погружений над поднятиями, прогрессивный рост впадин. Эти представления также встречают определенные возражения.

Во-первых, по многим данным Земля первоначально была не расплавленной, а холодной и разогрелась позднее вследствие накопления обусловленного радиоактивностью тепла (предполагается, что максимум разогрева еще не достигнут). Во-вторых, недостаточен учет магматических процессов, которые не сводятся только к сжатию подкоркового вещества при остывании. В-третьих, не объясняется периодичность динамической активности, краткость эпох активизации и длительность стабильных эпох в геологической истории Земли. Непонятна также избирательность тектонических движений (модель высыхающего яблока предполагает равномерную складчатость поверхности). Наконец, имеются расчетные данные В.А. Магницкого и других исследователей скорости остывания — менее градуса за миллион лет. При таком малом значении процесс остывания не может существенно повлиять на возбуждение напряжений в земной коре. Таким образом, гипотезу сжатия в ее классическом виде трудно признать состоятельной, хотя, несомненно то, что идея сжатия Земли должна учитываться при решении глобальных геофизических задач (Подобина, Родыгин, 2000).

Собственно *пульсационная модель* (лат. pulsatio — пульсация, биение) может рассматриваться как определенный компромисс между гипотезами расширения и контракции и основана на идее чередования в истории Земли фаз сжатия и расширения. Идея

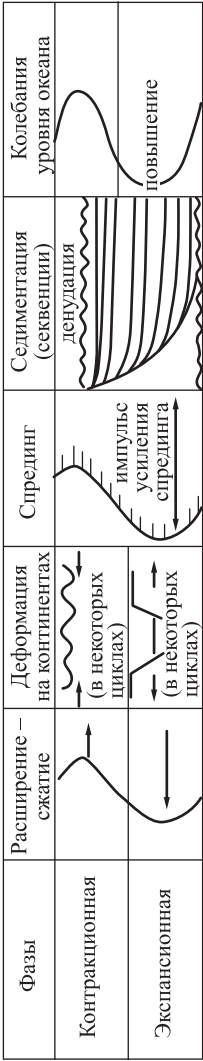
впервые высказывалась А. Ротплетцем, В. Бухером и другими исследователями и оформилась в виде гипотезы В.А. Обручевым и М.А. Усовым в 30-е гг. XX в. На стадиях расширения преобладают радиальные, вертикальные движения. В результате в подвижных поясах происходит растяжение коры с образованием геосинклиналей, в стабильных участках кора выпучивается, разбиваясь горстами и грабенами. Фазы расширения определяют также активизацию магматизма. Предполагается, что с расширением уменьшается давление на магматический слой, магма разжижается, интенсифицируются образование внедрений магматического вещества в вышележащие слои Земли и вулканическая деятельность. При сжатии преобладают тангенциальные движения, вызывающие смятие в складки геосинклинальных отложений и глыбовую складчатость фундамента платформ, образуются надвиги, усиливается региональная переработка горных пород под воздействием высоких давлений и температур (так называемый метаморфизм). Причиной сжатия (по В.А. Обручеву и М.А. Усову) являются выделение тепла на предшествующей стадии расширения благодаря выносу его лавами, газами, парами и т.д., а также гравитационное уплотнение внутренних областей Земли. Причины расширения, веро-

Евгений Евгеньевич Милановский (31.07.1923 — 11.02.2012) — почетный профессор МГУ имени М.В. Ломоносова, академик РАН, на протяжении многих лет возглавлял кафедру исторической и региональной геологии геологического факультета МГУ. Ветеран Великой Отечественной войны.

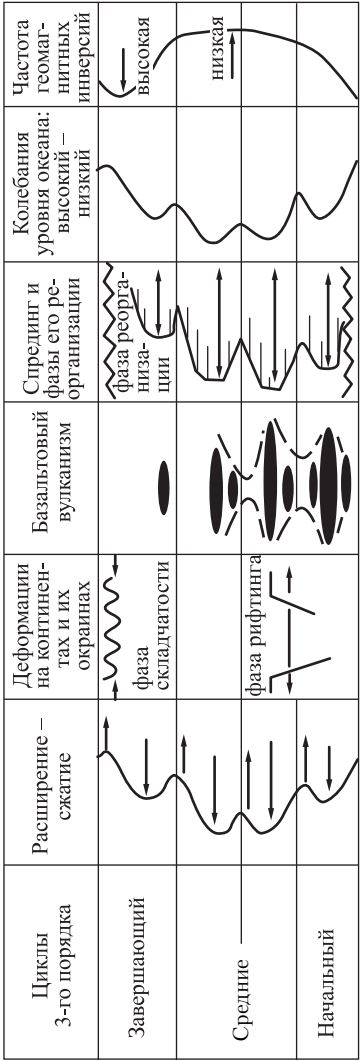
Научные интересы Е.Е. Милановского лежали в области региональной геологии, тектоники, неотектоники, теории рифтообразования и вулканологии. Им разработана методика неотектонического анализа горных стран, всесторонне исследована неотектоника Кавказа. Е.Е. Милановский развил систему представлений о стадийности орогенеза, типах орогенных структур, о характере орогенного вулканизма, его связях с неотектоническими деформациями и мантийными диапирами. Им разработано учение о континентальном рифтогенезе и его эволюции в истории Земли, предложена получившая широкое признание типизация рифтовых зон и систем. Ему удалось установить периодичность в проявлениях рифтообразования в ходе геологической истории. Выявленное чередование фаз усиления растяжения с фазами усиления деформаций сжатия в глобальном масштабе Е.Е. Милановский трактовал как результат пульсаций Земли на фоне ее умеренного неравномерного расширения.



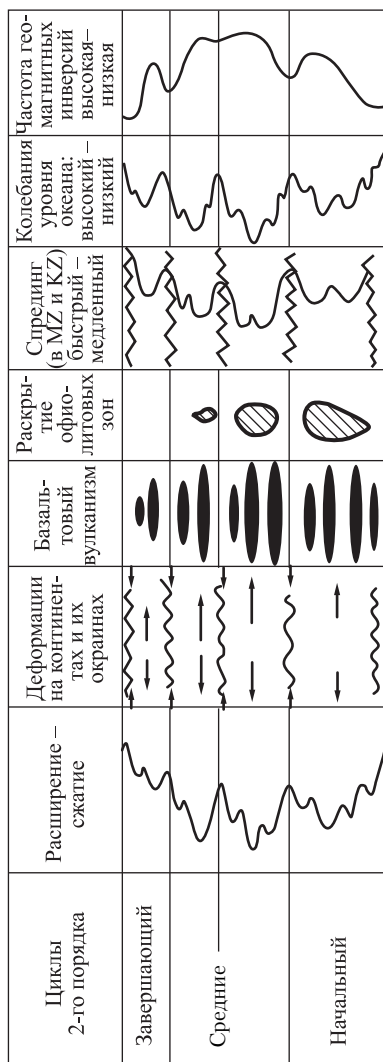
Цикл 3-го порядка (1—5 млн лет)



Цикл 2-го порядка (5—50 млн лет)



Цикл 1-го порядка (50—150 млн лет)



Метацикл (250—350 млн лет)

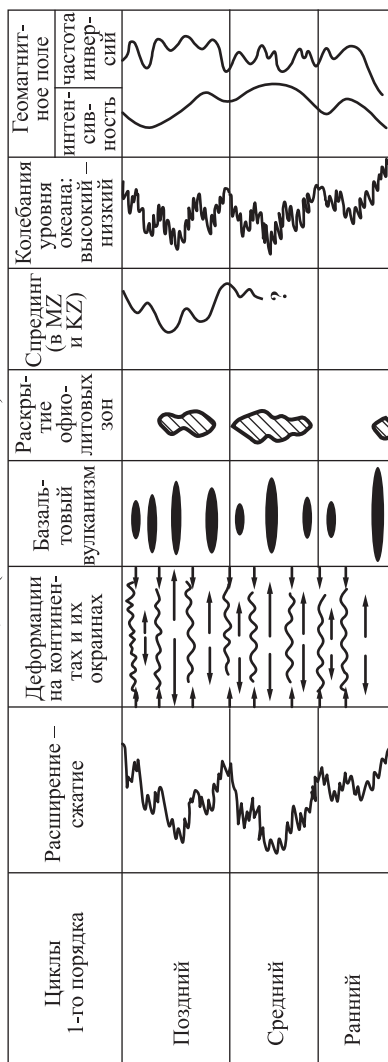


Рис. 2.7. Модели гло-
бальных геопульсаци-
онных циклов разных
порядков (Миланов-
ский, 1995). Стрел-
ками показано гло-
бальное преобладание
деформаций растяже-
ния и сжатия в те или
иные фазы и циклы

ятно, связаны с разжижением магмы. Пульсационная гипотеза активно развита исследованиями Е.Е. Милановского (1995), синтетически увязавшего процессы сжатия-расширения, активизации зон растяжения (рифтов), вулканизма и стадии трансгрессивно-регрессивных процессов (рис. 2.7).

Модель глобальной тектоники литосферных плит. Подобные представления первоначально сформулированы в виде *гипотезы дрейфа материков*. Идея о возможности горизонтального перемещения материков первоначально появилась исходя из заметной сопряженности контуров и геологических особенностей Южной Америки и Африки, Северной Америки и Европы, Южной Америки и Антарктиды. Гипотеза была сформулирована Ф. Тэйлором (Тэйлор, 1910) и А. Вегенером (Wegener, 1915). Предполагается, что современные континенты некогда (более 200 млн лет назад) образовывали единый суперконтинент Пангею. В пользу такой гипотезы говорит удивительное сходство очертаний западных и восточных береговых линий Атлантического океана, однотипность геологического строения смежных материков (например, единство гранитных массивов Бразилии и Африки), общность древней фауны и флоры. Оледенение, которое имело место на земле 300 млн лет назад, захватывало столь разные области, что объяснение этого явления встречает большие сложности. То же можно сказать и о положении магнитных полюсов Земли в прошлые эпохи. По палеомагнитным данным, полученным на разных континентах, они не совпадают друг с другом. Но все встает на свои места, если сблизить континенты. Гипотеза пережила сильную популярность в 20—30-е гг. и утратила ее к середине XX в. Причиной послужила неразработанность реального геофизического механизма такого перемещения, а также открытие глубинных разломов, уходящих в мантию и длительное время сохраняющих свое положение.

В 50—60-е гг. XX в., буквально через несколько лет после спада популярности гипотезы дрейфа материков, последовало возрождение идей горизонтальных движений на новой качественной основе (появилась концепция под названием *новая глобальная тектоника — тектоника плит, плейттектоника, неомобилизм*) после открытия подводных хребтов, протянувшихся по осевым зонам океанов (срединно-океанические хребты). По гребням этих хребтов располагаются глубокие трещины растяжения — рифтовые зоны, через которые на поверхность Земли поступает мантийное вещество. Рифты соединены друг с другом в единую

глобальную систему (рис. 2.8). Возраст дна океанов оказался сравнительно небольшим (150—160 млн лет) и увеличивается по мере удаления от срединно-океанических хребтов, тогда как средний возраст самих континентов обычно превышает 2—3 млрд лет. Вновь поступающее мантийное вещество оттесняет ранее выделившееся. В результате происходит раздвигание (спрединг) океанского дна в стороны хребтов. Согласно гипотезе спрединга расширение океанского дна обусловлено конвективными потоками вещества в верхней мантии, горячее вещество которой выносится наружу в местах расположения рифтов. За 200—300 млн лет все раздвигающееся океанское дно обновляется, а прежние породы погружаются в мантию в так называемых зонах субдукции (океанские желоба, расположенные вблизи островных дуг). В этих областях происходит погружение океанской литосферы, которая вначале уходит под островную дугу, а затем дальше под континент. По-видимому, именно этот процесс вызывает дрейф континентов. Например, Северная Америка и Европа постепенно

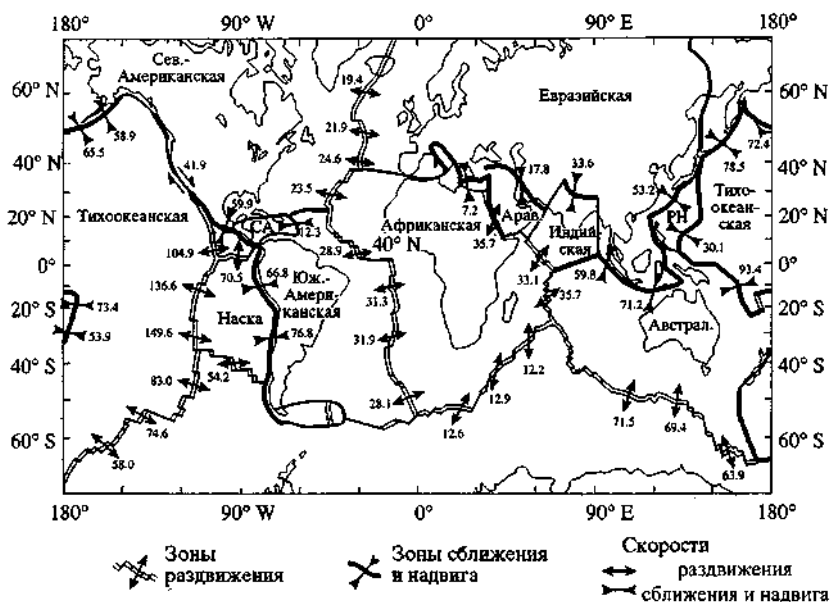


Рис. 2.8. Глобальная система литосферных плит Земли, зон раздвижения (спрединга) и сближения и надвига (субдукции). Показаны современные скорости (мм/год) движения земной коры вблизи границ литосферных плит (Татевян, 2004)

удаляются друг от друга по мере того, как между ними образуется новая океаническая кора.

Главной движущей силой в глобальной тектонике плит является сила тяги тяжелого погружающегося в мантию литосферного блока, т.е. в конечном счете — сила гравитации. В результате сжатия континентальной коры сходящимися плитами возникают молодые складчатые горы. Горообразование объясняется тем, что континентальная кора имеет малую плотность и поэтому при столкновении плит не может опуститься в мантию. При боковых перемещениях соседних плит возникают поперечные сдвиги (трансформные разломы). Там, где блоки океанской и континентальной коры воздействуют друг на друга, возникают сейсмически активные континентальные окраины. Варианты взаимодействия плит различны: коллизия в результате столкновения двух континентальных плит, сопровождаемая образованием горных систем (Гималаи), скольжение относительно друг друга (разлом Сан-Андреас в Калифорнии) и др. Подтверждением новой глобальной тектоники послужили выявление изменения положения континентов палеомагнитными методами и геофизическое подтверждение существования в верхней мантии слоя разуплотненного вещества — астеносферы.

В настоящее время популярность гипотезы новой глобальной тектоники снижается, сталкиваясь с явными трудностями. В частности, она не может объяснить отсутствие зон субдукции в некоторых областях (например, вокруг Антарктической и Африкано-Аравийской литосферных плит), отсутствие под некоторыми участками земной коры (прежде всего под так называемыми щитами, сформировавшимися в архейскую эру) зоны низких скоростей (астеносферы) и др. Кроме того, появление новых знаний об истории Земли в докембрийское время показывает, что данная концепция неприменима к ранним стадиям эволюции земной коры (Подобина, Родыгин, 2000).

Плюмтектоническая модель. Под плюмами понимают узкие колонны разогретого мантийного вещества, поднимающиеся из глубоких слоев мантии, в совокупности образуя глобальную плюм-систему планеты. Их зарождение происходит на глубине не менее 700 км, диаметр варьирует от 100 до 240 км, а скорость подъема составляет около 2 м/год. В результате деятельности плюмов формируются купола диаметром до 1000 км, центральные части которых возвышаются на 1–2 км. С плюмами связывают (иногда отождествляя) понятие горячих точек — участков земной поверх-

ности, выделяющихся резким увеличением вулканической активности. Плюмы встречаются как внутри плит (гавайского типа), так и на раздвигающихся границах плит (исландского типа). Они ведут себя, как твердое пластическое (возможно, частично расплавленное) тело, и поднимаются подобно соляным диапирам. Их вещество легче окружающих пород, а вязкость достаточно мала (порядка 10^{19} Пуаз) для возникновения режима течения. Постепенное уменьшение давления в веществе плюма приводит к увеличению доли расплава, что способствует дальнейшему подъему и обуславливает вулканическую активность в областях горячих точек (отделяется более легкая расплавленная часть). Предполагается, что плюмы являются частью сложной глобальной системы конвекционных потоков в жидком внешнем ядре и мантии. Возможны две модели тепловой гравитационной конвекции: по всей толще мантии от литосферы (30—100 км) до границы ядра с мантией (2900 км) и в двух слоях (в верхней и нижней мантии). Плюмы могут зарождаться на трех уровнях: в верхней мантии (в частности, при плавлении субдуцированных фрагментов литосферной плиты) и на границе мантии и ядра.

Плейтктоническая и плюмктоническая модели сегодня представляются как взаимно дополняющие друг друга. Обе они связаны с глобальным процессом мантийной конвекции, для которого разработаны различные динамические сценарии (Albarede, 1999) (рис. 2.9). Кроме того, предложена схема глобального процесса тектонической эволюции Земли, отражающая изменение характера взаимодействия плитного и плюмового механизмов во времени (Никишин, Якубчук, 2002) (рис. 2.10).

Фиксистская модель предполагает неизменность глобальной системы материков в истории Земли. При этом океаны образовались на месте континентов на мезозойско-кайнозойском этапе развития Земли. Земля длительное время разогревалась внутренними радиоактивными источниками тепла на глубинах в сотни километров. В результате частичного расплавления ультраосновных пород из верхней мантии выплавлялись базальты. Дальнейшая дифференциация базальтов приводила к обособлению в них кислого (гранитного) материала. Так сформировалась материковая кора, покрывшая уже в архее весь земной шар. На образовавшейся коре развивались лишь мелкие внутриконтинентальные морские бассейны, океаны отсутствовали. Возрастание разогрева привело к появлению очагов полного расплавления ультраосновного вещества мантии. Ультраосновной и основной (базальтовый)

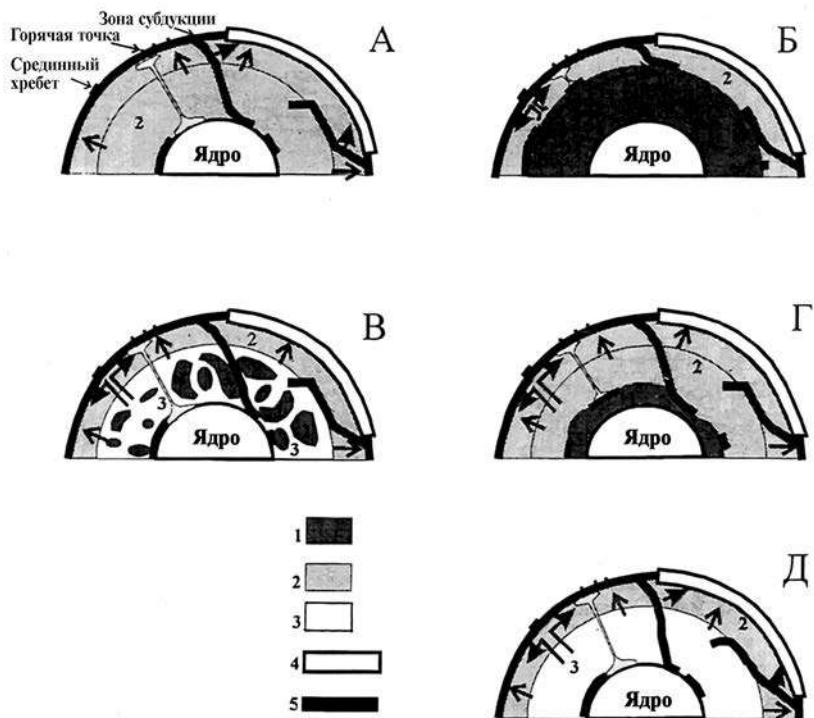


Рис. 2.9. Модели мантийной конвекции, включающие глобальные процессы развития плитной и плюмовой систем Земли (Albarede, 1999):

А — общемантийная конвекция с плитами, проходящими сквозь переходную зону; Б — многослойная мантийная конвекция с плитами, ограниченными в пределах верхней мантии; В — общемантийная конвекция с глубинными включениями первичной мантии; Г — многослойная мантийная конвекция с глубинным слоем первичной мантии; Д — общемантийная конвекция с деплетированием плит в зонах субдукции. Цифрами обозначены: 1—3 — типы мантии (1 — первичная, 2 — истощенная, 3 — обогащенная), 4 — континентальная литосфера, 5 — океаническая литосфера

расплавы устремлялись по разломам вверх, внедрялись в земную кору и изливались на поверхность, образуя эглогиты. Плотность их значительно возрастала, и утяжеленные глыбы коры вместе с внедрившимися интрузиями погружались обратно в мантию, расплавляясь в ней. В результате часть кислого материала коры замещалась ультраосновным материалом мантии, формируя кору нового типа. Этот процесс, называемый базификацией, в результате привел к «океанизации» — формированию океана на месте материка. Процесс обновления коры в основном завершился в меловой период, но местами продолжается до сих пор, так как опу-

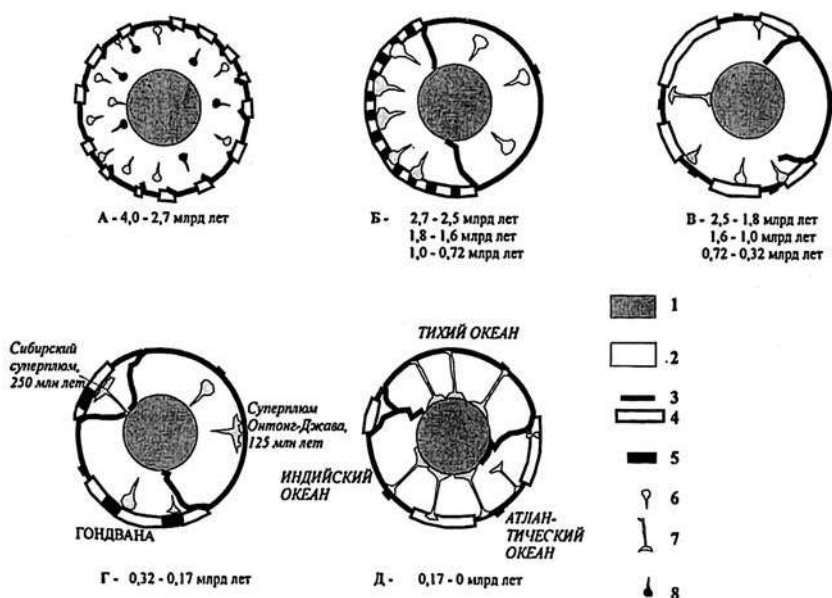


Рис. 2.10. Тектоническая эволюция Земли с изменением характера взаимодействия плитного и плюмового глобальных процессов во времени (Никишин, Якубчук, 2002). Цифрами обозначены: 1 — ядро, 2 — мантия, 3 — океаническая литосфера, 4 — континентальная литосфера, 5 — орогены, 6 — короткоживущие плюмы и суперплюмы, 7 — долгоживущие плюмы, 8 — холодные плюмы

скание дна океанов шло от их периферии к оси. Фиксизм получил развитие в трудах российских ученых В.В. Белоусова (Белоусов, 1968, 1975, 1978), В.В. Тихомирова (Тихомиров, 1977) и др.

Геосолитонная модель. Р.М. Бембелем с коллегами предложено и активно развивается учение о природе субвертикальных зон деструкции, которое определено как «геосолитонное». Поясним «геосолитонный характер» обозначенной концепции по тексту специально посвященной этой модели монографии Р.М. Бембеля с соавторами (Бембель и др., 2003). Слово «солитон» было введено впервые в 1965 г. в работе Н. Забуски и М. Крускала (Zabusky, Kruskal, 1965) для обозначения феноменального природного явления, одновременно похожего на частицу и на волну, но не являющегося в строгом смысле ни тем, ни другим. Солитон в широком понимании этого термина — не волна и не частица, а самостоятельное природное явление, объединяющее массу вещества и энергию поля. Сегодня солитоны открыты в самых разнообразных природных средах и районах Вселенной. Даже в плазме советский

физик Р. Сагдеев в 1958 г. показал существование «уединенных волн», которые изначально и называют солитонами.

Геосолитоны в качестве выделяющихся одиночных волн начинают свою жизнь и движение из Земли в Космос в плазме ядра планеты. Распространение солитонов от ядра через геосферы планеты осуществляется по глобальной системе взаимосвязанных каналов. Качественное объемное сейсмовидение высокого разрешения уже сегодня позволяет выделить такие принципиально новые геологические объекты. К ним можно отнести узкие, прерывистые, трубообразные субвертикальные зоны деструкции горных пород. Р.М. Бембелем такие образования описаны для территории Западной Сибири. Они являются локальными очагами активной генерации углеводородов и вместе с тем — очагами потенциальной технической аварийности для скважин, трубопроводов и других технических сооружений. Геосолитонная система, по мнению Р.М. Бембеля, связана с вращением Земли, кручением отдельных блоков земной коры и формированием планетарной системы крупных кольцевых структур (Бембель и др., 2003).

При движении ударной волны ее интенсивность изменяется существенно неодинаково в разных направлениях. Быстрее всего ударная волна ослабляется в сторону увеличения плотности, а в сторону резкого уменьшения плотности, напротив, она ускоряется и усиливается. Ускорение ударной волны пропорционально квадратному корню из отношения плотности среды в том месте, где она образуется, к плотности среды в том месте, где она выходит на свободную поверхность. Это приводит к преобладающему субвертикальному направлению зон деструкции горных пород, которое соответствует направлению градиента плотности в осадочных субгоризонтальных отложениях. К таким субвертикальным зонам можно отнести столбообразные аномалии сейсмической записи, характеризующиеся резким падением амплитуд отражений и контролирующие многопластовые залежи углеводородов. Примеры подобных феноменов приведены Р.М. Бембелем с коллегами (Бембель и др., 2003). Они обнаруживают, по нашему мнению, сходство, в частности, некоторых нефтяных месторождений Степновского сложного вала в Заволжье с иными структурами (Рыскин, Иванов, 2003).

Перколяционная модель тектоносферы (Горяинов, Иванов, 2001) основана на главенствующей геодинамической роли процессов глобальной самоорганизации литосферы, обуславливающих ее фрактальное строение. Впервые идея о самоподобии

геофизической среды была озвучена М.А. Садовским (Садовский, 1979, 1986; Садовский, Писаренко, 1989, 1991). Он предлагал рассматривать литосферу как систему взаимодействующих неоднородностей, которые могут иметь различную природу (геологические блоки, плотностные, химические, тепловые и иные неоднородности горных пород, различные агрегатные состояния вещества и т.п.). В процессе подпитки эндогенной энергией система неоднородностей-отдельностей самоорганизуется в единую диссипативную структуру, имеющую самоподобный (иерархический) характер. Этот процесс связан с постоянной вибрацией литосферы в огромном диапазоне масштабов и частот (от тепловых колебаний молекул до землетрясений и подвижек континентальных плит). «Все это делает геофизическую среду похожей больше на систему перетекающих “жидких сгустков”, чем на укоренившуюся в нашем воображении “земную твердь”» (Садовский, Писаренко, 1989). Формирование структур в такой среде сопровождается неустойчивостями, случайностями, катастрофическими событиями. Новая структура становится устойчивее благодаря более эффективной диссипации подкачиваемой энергии через возникшую систему связности — глобальную систему перколяционных кластеров (перколяционную сеть планеты). Эта сеть выражена посредством функционирования в истории Земли глобальной системы рифтов, регматических элементов и др.

Помимо теории перколяции авторы данной модели (Горяинов, Иванюк, 2001) активно привлекают известный механизм самоорганизации конвективных ячеек Бенара. Но, в отличие от классических конвективных «бенаров», восходящие струи структурированного эндогенного энергопотока чаще сконцентрированы «в узоре кластера» — по периферии ячеек. Кроме того, такой процесс не имеет отношения к конвекции, на которой основывается модель глобальной тектоники литосферных плит. «Структура Бенара образуется вследствие согласованного поведения микрочастей. Любое “извлечение” из такой системы какого-либо фрагмента (отдельной ячейки) ведет к моментальной перестройке структуры, а какие-либо признаки независимого (аддитивного) перемещения или изъятия исчезают без следа. Концепция плитной тектоники основана на том, что координатные изменения блоков запечатлены в геологической летописи благодаря независимому друг от друга перемещению блоков» (Горяинов, Иванюк, 2001).

Предполагается, что контрапунктом геологической эволюции тектоносферы является устойчивость (гомеостазис) ее глобаль-

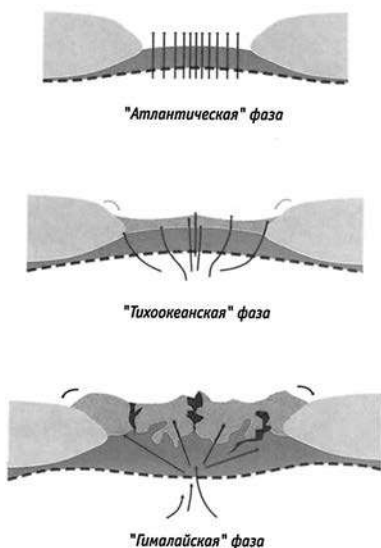


Рис. 2.11. Развитие перколяционной зоны как элемента глобальной перколяционной системы Земли по механизму «модифицированного цикла Вильсона» (Горяинов, Иванюк, 2001)

ного структурного макроузора при непрерывно активной динамике на региональном и локальном уровнях. Это и составляет главный физический (геодинамический) смысл геологической самоорганизации — постоянного усложнения, упорядочения, дифференциации в структуре тектоносферы. В основе механизма перколяционной модели лежит «модифицированный цикл Вильсона», включающий несколько стадий (рис. 2.11).

На первой стадии перколяционный энергопоток вызывает обновление океанического ложа, формируется рифт с бассейнами (впадинами). На второй стадии впадины заполняются осадками, вулканитами, энергопоток распределяется неравномерно и «находит» выходы, нередко сопровождаемые магматитами. На третьей стадии океаническая кора, прежде всего рифтовая долина (впадина), «зарастает», заполняясь вулканогенно-осадочными и магматическими формациями. На заключительной стадии перколяционный поток уже не имеет свободного выхода, форма которого часто становится линейно-точечной (известные так называемые горячие точки, например, в районе Гавайских островов), линейные сети отмирают, «зарастают». Прорыв энергопотока сопровождается тектоническим тремором, вызывает ударные возмущения. Именно поэтому гипоцентры землетрясений и вулканические цепи подчеркивают единую фрактальную перколяционную глобальную сеть, вдоль которой и происходит эндогенная энергетическая разгрузка — независимо от того, чем в настоящее время выражены ее элементы: древними горными массивами, активными островными дугами или зарождающимися срединно-океаническими хребтами. Все горячие точки приурочены к глобальной перколяционной сети (Горяинов, Иванюк, 2001; Turcotte, Schubert, 1982).

В настоящее время представления о геодинамических механизмах планеты вступают в новый этап своего развития, который в целом характеризуется формированием **синтетической модели глобальной геодинамики**. Исследователи активно разрабатывают точки пересечения существующих концепций, стремясь логически увязать рациональные элементы разных взглядов. Результаты такого синтеза можно увидеть в работах российских геологов В.Е. Хаина, Е.Е. Милановского, Д.Е. Пушаровского, А.М. Никишина и других исследователей. Так, В.Е. Хаин (Хаин, 1995) предложил один из вариантов «комбинированной» глобальной модели, предполагая, что пульсации Земли и действие тектоники литосферных плит происходят на фоне весьма медленного, но неуклонного сжатия Земли. По данным сейсмотомографии и установлению тектонической расслоенности литосферы и многоярусной природы мантийной конвекции синтетическую глобально-динамическую нелинейную модель Земли предложили японские геологи (Maryama et al., 1994). Основу их представлений составляет триада: тектоника ядра (тектоника роста), плюмтектоника, распространяющаяся на вещество Земли от ядра до верхней мантии, и тектоника плит, присущая земной коре и верхней мантии.

Открытия глобальных процессов по всей мантии и в ядре позволили В.Е. Хаину сделать вывод, что все оболочки Земли являются динамически активными. Им осуществлялся синтез ряда гипотез, основанный на идее доминирования на каждой конкретной стадии геологического развития планеты «своей» геодинамической модели (последовательно: тектоника роста — плюмтектоника — плейттектоника — контракционная — терминальная). По его данным, на стадии тектоники роста, которую прошли все планеты, формировалось ядро, а на поверхности — магматический океан. На стадии плюмтектоники, которую проходит Венера и проходила Земля до 4 млрд лет назад, началась конвекция в виде перемещения колонн и капель разогретого вещества. На стадии плейттектоники, начавшейся 4 млрд лет назад, конвекция стала осуществляться за счет линейного погружения и подъема разогретого вещества. На стадии контракционной тектоники, на которой находятся Марс и Меркурий, господствует сжатие с погружением вещества, возникают немногочисленные разрывы, по ним к поверхности поднимается магма, дающая начало крупным вулканам. На заключительной стадии терминальной тектоники, «пережитой» Луной и малыми планетами, происходят лишь образование разрывов и газовые эманации, поверхность планеты изменяется только внешними факторами.



Виктор Ефимович Хаин (13(26).02.1914 — 24.12.2009) — выдающийся геолог, академик РАН и многих национальных и международных академий, почетный профессор МГУ имени М.В. Ломоносова. Ветеран Великой Отечественной войны.

В 1993 г. за цикл работ «Глобальная тектоника Земли» удостоен первой премии имени М.В. Ломоносова. Многие работы посвятил глобальным проблемам человечества: исследованиям цикличности сейсмической и вулканической активности и их связи с другими геологическими и космическими факторами. Его исследования глобальных геопроцессов позволили с новых позиций взглянуть на климатические изменения и геологическую жизнь Земли. В 2009 г. В.Е. Хаин выступил

инициатором Коммюнике «Geochange» («Geochange» Communiqué по глобальным изменениям геологической среды) совместно со своим учеником Э.Н. Халиловым. В нем приводятся факты, подтверждающие глобальные изменения геологической среды, являющиеся причиной существенного повышения сейсмической и вулканической активности Земли, а также существенного ускорения дрейфа магнитных полюсов и глобальных климатических изменений. Коммюнике представлено в ООН, Евросоюз, Международные организации и главам государств. При научной поддержке В.Е. Хаина создана Глобальная сеть прогнозирования землетрясений (Global Network for the Forecasting of Earthquakes).

2.6. Фрактально-ячеистая структура геосфер Земли

Необходимо сделать пояснения по **фрактальности геосистем**. Геометрическое описание объектов, безусловно, составляет основу изучения геосистем и является одной из важнейших задач геологии и географии. По традиции основой интуитивного понимания геометрии геологических структур служат евклидовы фигуры: прямые, окружности, сферы, плоскости и т.д., — а любые отклонения от этих форм часто объясняются некими наложенными деструктивными процессами (смятие пластов горных пород в складки, расщепление их разломами и др.) (Васильев, 1997; Горяинов, Иванюк, 2001). Вместе с тем математикой давно разработано множество понятий, выходящих за рамки традиционной геометрии.

Под фракталами понимают множества, демонстрирующие на разных масштабах разрешения своей геометрической структуры свойства подобия в строгом или приближенном смысле, а также объекты в природе, обладающие этим свойством, хотя бы приближенно, в достаточно широком интервале масштабов. Понятие

«фрактал» широко вошло в обиход благодаря математику Бенуа Мандельброту, который и придумал неологизм «фрактал». Сам Б. Мандельброт пишет об этом так (Мандельброт, 2002): «Термин *фрактал* я образовал от латинского причастия *fractus*. Соответствующий глагол *frangere* переводится как ломать, разламывать, то есть создавать фрагменты неправильной формы. Таким образом, разумно — и как кстати! — будет предположить, что помимо значения “фрагментированный” (как, например, в словах *фракция* или *рефракция*), слово *fractus* должно иметь и значение “неправильный по форме” — примером сочетания обоих значений может служить слово *фрагмент*».

Хотя целый ряд примеров фрактальных множеств был придуман математиками гораздо раньше как иллюстрации «тонких» моментов математической теории, именно Б. Мандельброт обратил внимание на то, что эти объекты могут рассматриваться не только как «математические монстры», но как модели геометрических свойств вполне реальных образований в природе. Б. Мандельброту принадлежит следующее определение: «Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому» (Федер, 1991).

Первая «встреча» с фракталами на практике произошла именно на примере геосистем при решении фактически географической задачи, когда известный английский физик Л.Ф. Ричардсон попытался измерить длину береговой линии Британии. Используемый им метод состоял в следующем: он заменил линию побережья на карте Британии ломаной линией, составленной из отрезков длиной δ , граничные точки которых (начало и конец) располагались на побережье. Общее число N таких отрезков, естественно, зависит от их длины (будем обозначать факт зависимости N от δ как N_δ), а их суммарная длина $L_\delta = \delta \times N_\delta$ должна быть, по идее Ричардсона, приближенно равна длине береговой линии L . Далее, рассуждал Ричардсон, чем более подробную карту брать, тем меньше длина δ одного отрезка, и тем точнее будет измерена длина береговой линии L . При стремлении величины δ к нулю приближенная длина побережья L_δ должна вроде бы стремиться к истинной длине L . Альтернативный вариант измерения длины береговой линии заключается в том, чтобы покрыть карту побережья квадратной сеткой. Пусть в этом случае квадратные ячейки сетки имеют размер $\delta \times \delta$. Число $N(\delta)$ таких ячеек, необходимых для того, чтобы покрыть береговую линию на карте, приближенно равно целому числу отрезков ломаной длиной δ . Уменьшение

размера δ приводит к увеличению числа ячеек, необходимых для покрытия береговой линии. Если бы береговая линия имела вполне определенную длину L_δ , то можно было бы ожидать, что число отрезков ломаной линии N_δ или число квадратных ячеек $N(\delta)$, необходимых для полного покрытия береговой линии на карте, будет обратно пропорционально δ , а величина $L_\delta = N(\delta) \times \delta$ при уменьшении δ будет стремиться к постоянной L . Однако нашим ожиданиям не суждено оправдаться: при уменьшении величины δ измеренная длина береговой линии L_δ возрастает и отнюдь не стремится к какому-либо постоянному значению L .

При уменьшении размера δ измеренная длина береговой линии L_δ возрастает. График на этом рисунке выполнен в двойном логарифмическом масштабе и показывает, что при уменьшении величины δ измеренная длина L_δ возрастает, причем зависимость L_δ от δ прекрасно описывается приближенной формулой

$$L_\delta = a\delta^{1-D}. \quad (2.4)$$

Для обычной кривой $a = L$ (по крайней мере, для малых δ), а показатель D равен единице.

Действительно, если измерять длину линии L , покрывая ее ячейками размера $\delta \times \delta$, то число таких ячеек, необходимых для полного покрытия линии, будет $N(\delta) \cong L/\delta$, а примерная длина L_δ , определенная таким образом, будет $L_\delta = N(\delta) \times \delta \cong L$. Если подобным образом измерять площадь S какой-либо плоской фигуры, то число ячеек $N(\delta)$ будет определяться как $N(\delta) \cong S/\delta^2$. Таким образом, число ячеек $N(\delta)$, необходимое для полного покрытия рассматриваемого объекта, оказывается зависящим от величины δ как

$$N(\delta) \sim \delta^{-D}. \quad (2.5)$$

Величина D называется *емкостной размерностью*. Она может быть получена из соотношения (2.5)

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N(\delta)}{\log \delta}. \quad (2.6)$$

Для «обычных» геометрических объектов емкостная размерность является целым числом: для линии $D = 1$, для плоскости $D = 2$, для объемного объекта в трехмерном евклидовом пространстве $D = 3$ и т.д. А вот для длины побережья величина емкостной размерности D оказывается дробной! Так, размерность побережья Норвегии составляет $D \approx 1,52$, а побережья Великобритании

$D \approx 1,3$. На рис. 2.12; 2.13 приведены результаты, полученные Ричардсоном. Из них видно, что береговые линии характеризуются дробным значением емкостной размерности. А вот емкостная размерность окружности оказывается, как и положено для линии, $D = 1$.

Таким образом, помимо традиционных геометрических объектов, емкостная размерность которых равна целому числу, су-

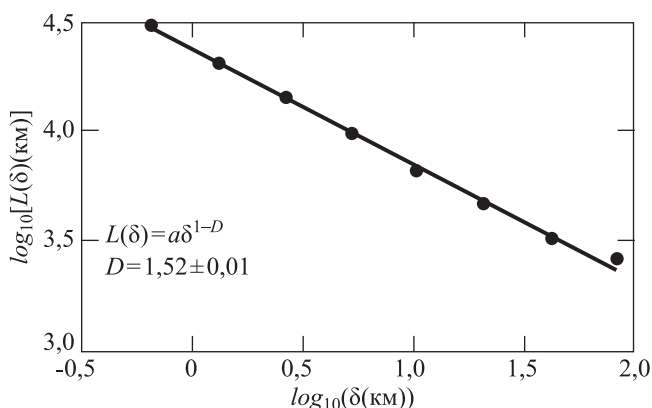


Рис. 2.12. Измеренная длина береговой линии как функция шага δ (измеряется в км). Прямая на графике в двойном логарифмическом масштабе соответствует зависимости $L_\delta = a\delta^{1-D}$, где $D \approx 1,52$ (Федер, 1991)

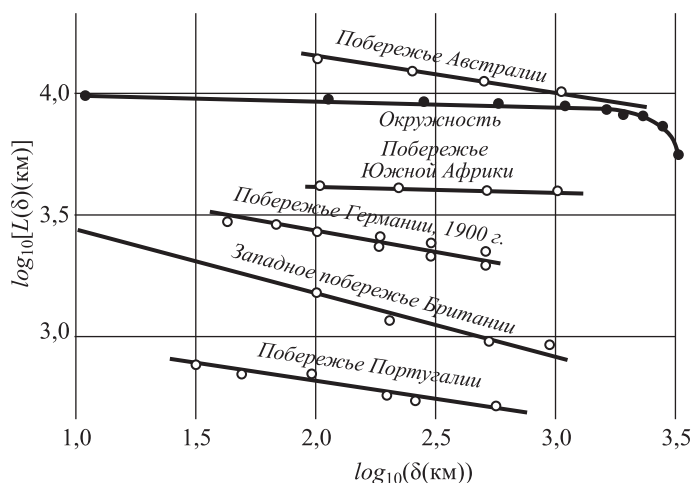


Рис. 2.13. Длина береговых линий как функция выбранного шага разбиения δ (Федер, 1991)

ществуют еще объекты, характеризующиеся дробным значением размерности. Именно от дробной размерности берет свое начало слово «фрактал» (fraction — дробь, *англ.*). Таким образом, можно дать еще одно определение фрактала, опираясь на его свойства иметь дробную величину емкостной размерности: фрактал — это множество, емкостная размерность которого (иногда емкостную размерность называют размерностью Хаусдорфа-Безиковича) оказывается дробной.

Рассмотрим простейшие примеры фракталов, являющиеся эталонными объектами синергетики, анализируя которые можно понять принцип строения фрактала. Самый простейший фрактал связан с построением, предложенным еще в прошлом веке основоположником теории множеств Георгом Кантором. Разделим единичный отрезок на три равные части и «выбросим» интервал, занимающий среднюю треть. Каждый из оставшихся отрезков вновь делим на три части и выбрасываем среднюю треть и т.д. (рис. 2.14). То, что остается в итоге, и есть фрактальное множество Кантора, или, как его иногда еще называют, «канторова пыль».

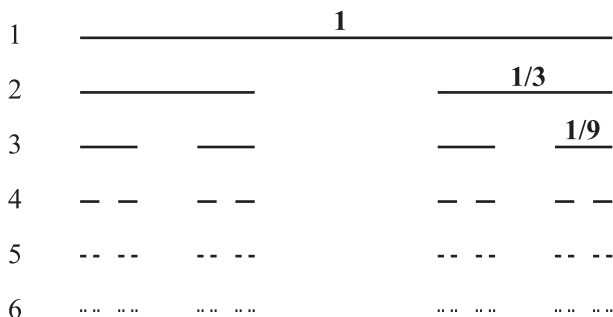


Рис. 2.14. Построение канторова множества

Другой пример фрактала — снежинка Коха (рис. 2.15). Ее построение начинается с равностороннего треугольника, затем на каждой стороне средняя треть заменяется ломаной линией, состоящей из двух отрезков такой же длины. Эта процедура повторяется до бесконечности, в результате чего получается область с фрактальной границей.

Еще один фрактальный объект — салфетка Серпинского. В его основе лежит равносторонний треугольник, который можно разбить на четыре одинаковых равносторонних треугольника и удалить центральный. То же самое проделывается с каждым остав-

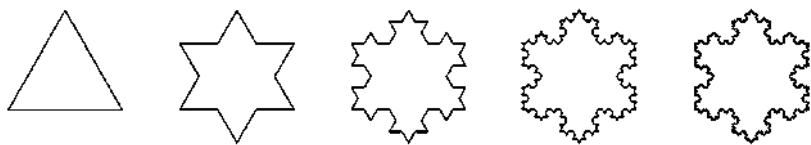


Рис. 2.15. Построение снежинки Коха

шимся треугольником до бесконечности. Аналогичным образом строится ковер Серпинского (в его основе лежит квадрат), а подобное построение в трехмерном пространстве дает фрактал, называемый губкой Серпинского (Алешковский и др., 2010; Безручко и др., 2005).

Познакомившись с простейшими примерами фракталов, можно подумать о том, что фрактал — всего лишь математическая абстракция. Однако фрактальные объекты часто встречаются в природе. Б. Мандельбротом и другими исследователями было показано, что фрактальные свойства демонстрируют многие геосистемы Земли: изолинии высот вообще и береговые линии в частности, очертания пещер и др.

Интересно, что основное свойство фрактала — это самоподобие: фракталом является объект, состоящий из частей, которые в каком-то смысле подобны целому, причем это подобие может быть как геометрическим, так и статистическим. Именно это свойство фракталов наиболее часто встречается в природе. Действительно, очень многое в живой и неживой природе характеризуется бесконечным повторением одного и того же узора, увеличенного или уменьшенного во сколько угодно раз. Так, дерево имеет ветви, от которых отходят ветви поменьше, от тех — еще меньше и так вплоть до самых тонких отростков. Если сфотографировать само дерево и его ветки разных размеров, убрать все, что говорит о масштабе изображений, и сравнить их друг с другом, скорее всего мы не сможем определить истинное соотношение этих объектов. Точно так же ведут себя речные сети на картах разного масштаба (и в целом глобальная эрозионная сеть планеты) или, например, дендриты — ветвистые образования минералов. Еще одним типом фрактальных объектов являются горы, форма пиков и конфигурация цепей которых повторяются в очень широком интервале масштабов (Горяинов, Иванюк, 2001).

Концепция коэволюции геосфер (Иванов, 2004, 2009; Goldfein et al., 2011) предполагает возможность выделения комплекса общих свойств оболочек Земли как глобальных систем, наиболее

показательными из которых являются ячеистость и фрактальность. Целесообразно развитие **фрактально-ячеистой модели геосфер**, базирующейся на следующих основных положениях.

1. Каждая геосфера потенциально может быть расслоена на подсферы практически бесконечно. Хорошим примером служит стратисфера (слоистая оболочка планеты — осадочный чехол), в составе которой возможно выделить сколь угодно малые прослои, условно считая их отдельными подоболочками (рис. 2.16). При этом налицо подобие форм геологических тел разных размеров (слоев, линз, террас, форм прилегания и т.п.). Фрактальные свойства систем слоев известны и изучаются, в частности, по данным каротажа (см. например, Нургалиева и др., 2007 и др.) (рис. 2.17).



Рис. 2.16. Интервал осадочного чехла (стратисферы) — фрактальная система потенциально бесконечной слоистости (верхнемеловые отложения в Саратовском Поволжье)

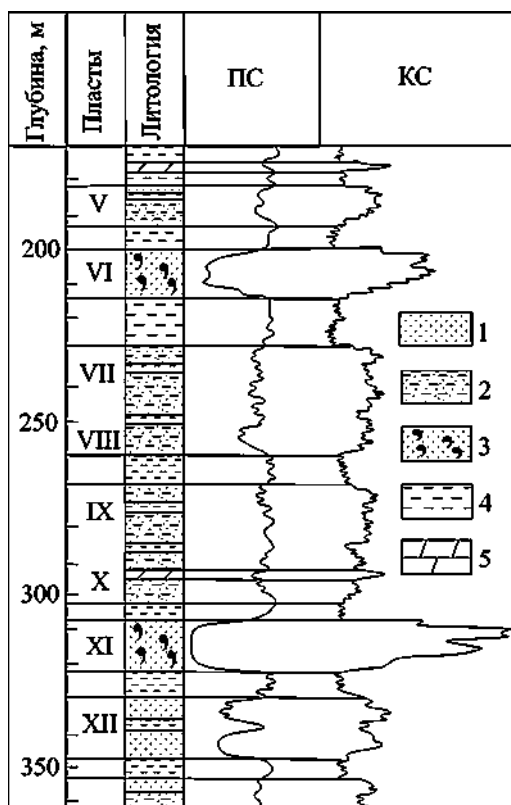
2. Фрактальность границ геосфер. Ярким примером является граница литосферы, гидросферы и атмосферы. В геоморфологическом выражении — это система береговых линий в совокупности с эрозионной сетью планеты. Береговая линия широко известна как показательный пример фрактальной природной структуры. Само-

Рис. 2.17. Диаграммы электрического каротажа разреза по скважине (Степанов, Месежников, 1979, с упрощениями), отражающие фрактальные свойства систем слоев. ПС — кривая спонтанной поляризации, КС — кривая кажущихся сопротивлений. Цифрами обозначены: 1 — пески, 2 — глинистые пески, 3 — нефтенасыщенные песчаники, 4 — глины, 5 — мергели

подобие эрозионной сети (рис. 2.18 и 2.19) (причем не только в плановом рисунке, но и в разрезе — прослеживаются качественные аналогии с кривой Коха) также доказано. При анализе глобальной эрозионной структуры в плане выделяются разноранговые отдельности (ячейки). С названными особенностями геолого-геоморфологического субстрата тесно связано

глобальное распределение живого вещества биосферы, что позволяет говорить о ее фрактально-ячеистых свойствах. Наиболее сложные фрактальные структуры на границе литосферы, гидросферы и атмосферы, связанные с биогеоценотической и ландшафтной системами, можно продемонстрировать на примере дельт рек (рис. 2.20).

3. Все геосферы пронизаны фрактальными структурами. Литосфера и ее подслесы разбиты фрактальной глобальной системой трещиноватости (самоподобной не только в плане, но и в разрезе (рис. 2.21)) на многогранные блоки (ячейки) разного ранга (Кэри, 1991) (рис. 2.24). Более того, так называемая перколяционная нелинейная модель тектоносферы базируется на механизме конвективной термогравитационной неустойчивости Бенара (как известно, «ячейки Бенара» имеют полигональный облик) (Горяинов, Ива-



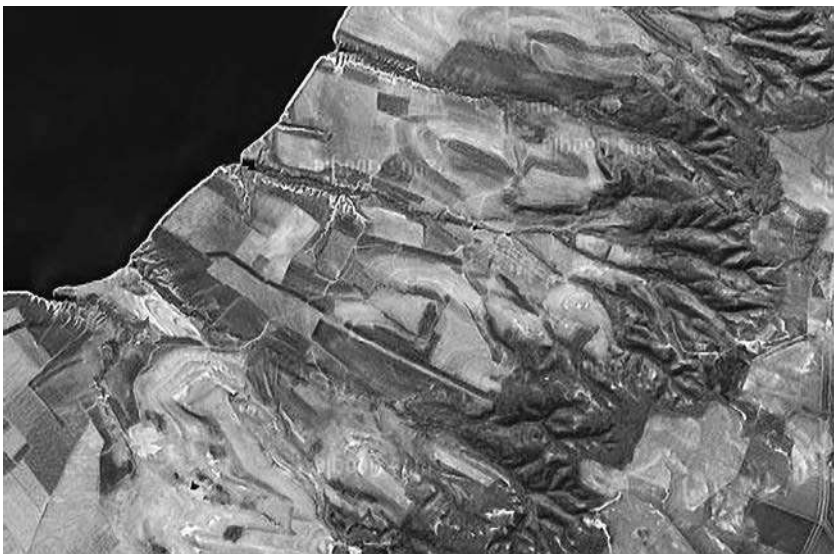


Рис. 2.18. Овражно-балочная сеть (фрагмент глобальной эрозионной сети) как пример природных фракталов (береговая зона р. Волги)

нюк, 2001 и др.). Мантия Земли имеет сложные внутренние неоднородности, которые визуальнo на качественном уровне могут быть определены как самоподобные (рис. 2.25). Система «литосфера-мантия» пронизана системой плюмов и структурами геосолитонной природы (Бембель и др., 2003) и т.д. Более того, посредством развития подобных структур осуществляется взаимодействие геосфер. Так, Ф.А. Летников выделяет ряд проявляющих синергетические эффекты систем («разлом — ионосфера», «разлом — элек-

трическая коммуникация», «разлом — техногенное сооружение») (рис. 2.22, 2.23), что находит отражение при решении эколого-геологических задач (Трофимов, Зилинг, 2002).

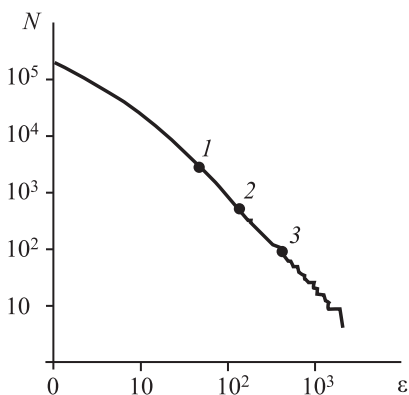


Рис. 2.19. Зависимость числа ячеек покрытия (N) овражно-балочной сети одного из модельных полигонов в Поволжье от размера ячейки (ϵ), построенная в двойном логарифмическом масштабе, доказывающая фрактальные свойства эрозионной сети (Иванов и др., 2006)



Рис. 2.20. Дельта Волги как сложнейшая фрактальная структура на границе литосферы, гидросферы и атмосферы, связанная с биогеоценотическими и ландшафтными системами. (Космический снимок: материалы кафедры геоэкологии Саратовского государственного университета)

4. Особый интерес представляет вопрос динамики и развития фрактально-ячеистой структуры геосфер в свете глобальной эволюции Земли и коэволюции ее оболочек. Закономерности таких изменений во времени на сегодняшний день не вполне ясны, но отдельные аспекты четко просматриваются. Так, по палеогеографическим данным можно судить об изменениях в геологическом вре-

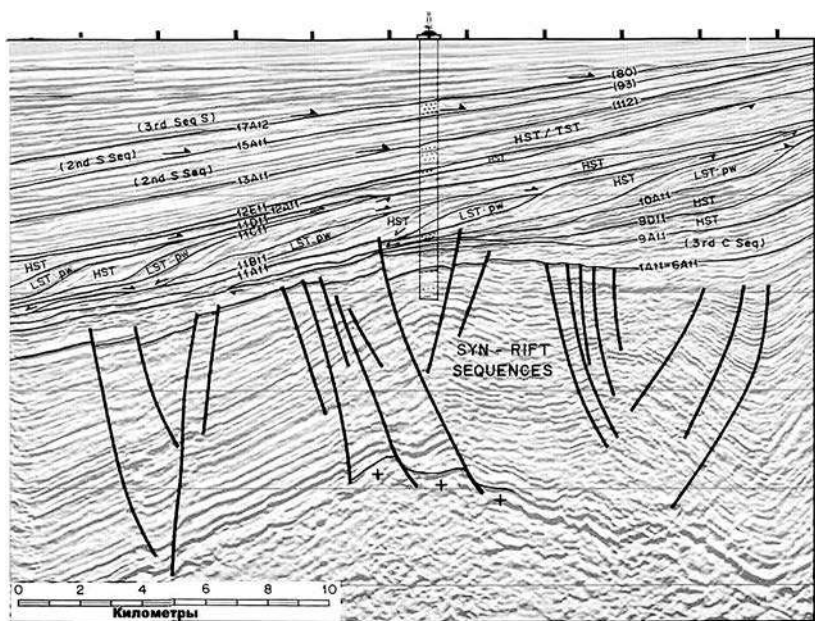


Рис. 2.21. Фрагмент разломно-трещинной системы литосферы, обладающей фрактальными свойствами (пример сейсмического профиля земной коры) (Габдуллин и др., 2010)

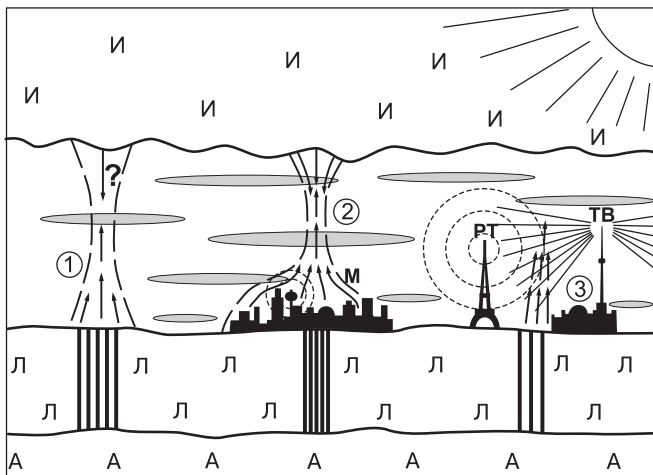


Рис. 2.22. Взаимодействие литосферных, ионосферных и техносферных систем (Летников, 1998):

А — астеносфера; Л — литосфера; И — ионосфера; 1 — взаимодействие в системе «разлом —

ионосфера»; 2 — взаимодействие в системе «разлом — мегаполис (М) — ионосфера»; 3 — взаимодействие в системе «разлом — радиотранслятор (РТ) — телетранслятор (ТВ)». Тонким крапом обозначены «облака» атмосферного электричества

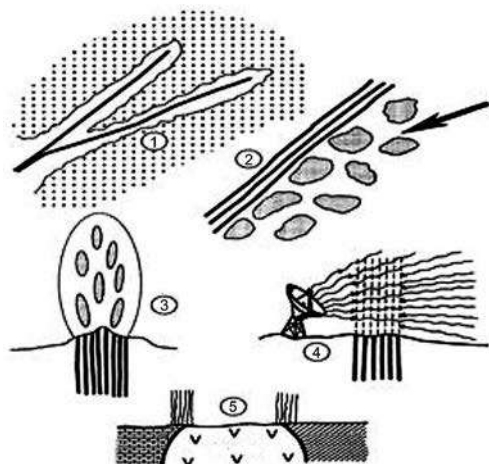


Рис. 2.23. Наиболее типичные проявления аномальных свойств геологическими структурами Земли (Летников, 1998):

1 — размывание облачности над зонами глубинных разломов; 2 — экранирование глубинным разломом прохождения кучевых облаков (стрелкой показано направление ветра); 3 — светящиеся образования над зоной глубинного разлома; 4 — экранирование обратного сигнала радиолокационной станции над зоной глубинного разлома; 5 — резкоградиентные зоны на контактах разнородных геологических тел

мени особенностей границы литосферы, гидросферы и атмосферы (как системы береговых линий, так и эрозионной сети). Отдельным направлением исследований, имеющим очевидное практическое значение, является изучение взаимосвязи фрактально-ячеистой структуры геосфер с ноосферными процессами, с антропогенной деятельностью и преобразованием человечеством природной среды, глобальным взаимодействием человека с природой. При этом, в частности, интересны результаты исследований Р.Х. Сунгатуллина (Сунгатуллин, 2010) по сопряженности минерагенической, рельефной и техногенной ячеистости (рис. 2.26). Здесь можно обозначить множество конкретных вопросов, требующих



Рис. 2.24. Ячейки Кэри (1991)



Рис. 2.25. Трехмерная модель мантии Земли, развернутой в параллелепипед (Su et al., 1994)

специального изучения. Например, авторами исследуются изменения овражно-балочной сети и ее фрактальных свойств в зонах урбанизации (Иванов и др., 2006). Известно также, что механизм передвижения вещества геосфер предусматривает функционирование ячеек, что позволяет говорить о сходной глобальной ячейности основных физических оболочек планеты: конвективные ячейки мантии и литосферы (с позиций глобальной тектоники литосферных плит) (рис. 2.27, 2.28), ячейки глобальной атмосферной циркуляции (рис. 2.29), ячейки гидросферы (рис. 2.30, 2.31).

Изложенные воззрения важны также применительно к верхней части геолого-геоморфологического субстрата, что особенно актуально при оценке развития урбосферы как результата глобального процесса урбанизации. Главным фактором, определяющим эколого-геологические опасности, является разломно-трещинная сеть геолого-геоморфологического субстрата, обуславливающая

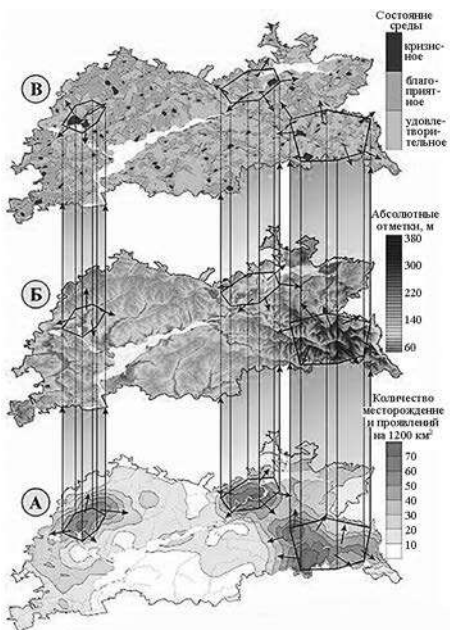


Рис. 2.26. Сопряженность минерагенической, рельефной и техногенной ячейности (Сунгатуллин, 2010):

А — минерагеническая модель; Б — модель современного рельефа; В — техногенная модель (стрелками показан горизонтальный и вертикальный энергомассоперенос)

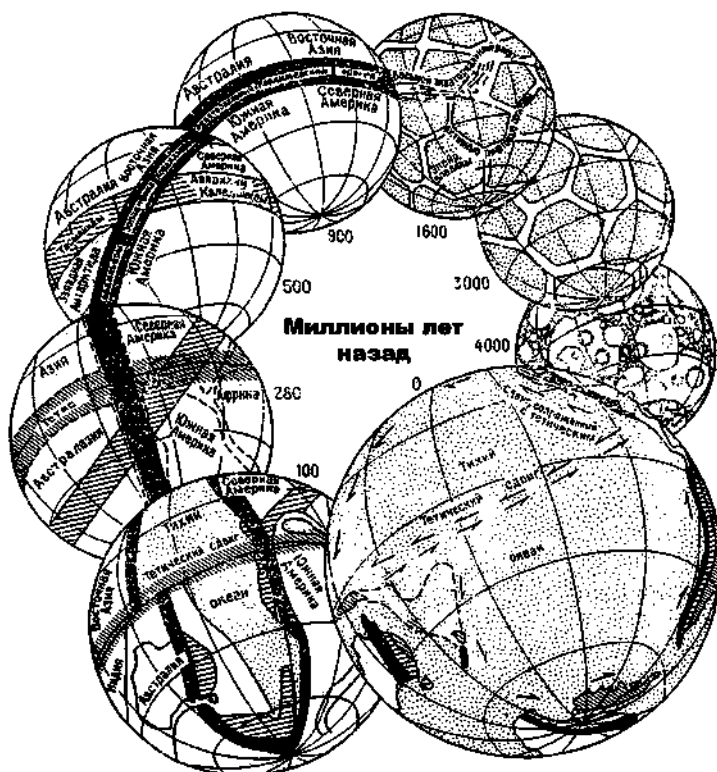


Рис. 2.27. Изменение глобальных ячеистых систем в истории Земли (Кэри, 1991)

своим строением, функционированием и развитием проявление опасных процессов, что позволяет говорить о роли геодинамической сети в эволюции городов. Анализ ряда модельных участков показывает массовое проявление элементов разломно-трещинной сети, разнообразных по направлению, рангу и генезису, причем увязанных в систему решетчатого облика. Основным геодинамическим элементом геолого-геоморфологического субстрата являются многоугольные в плане, субпризматические геолого-геоморфологические блоки (ячейки), контролируемые элементами разломно-трещинной сети. Они ранжируются и проявляют свойство самоподобия.

Имеет место эндогенно-экзогенный дуализм: тектонические разломы контролируют крупные ячей, экзогенные трещины — более мелкие. Исходя из такой модели дуговые (кольцевые)

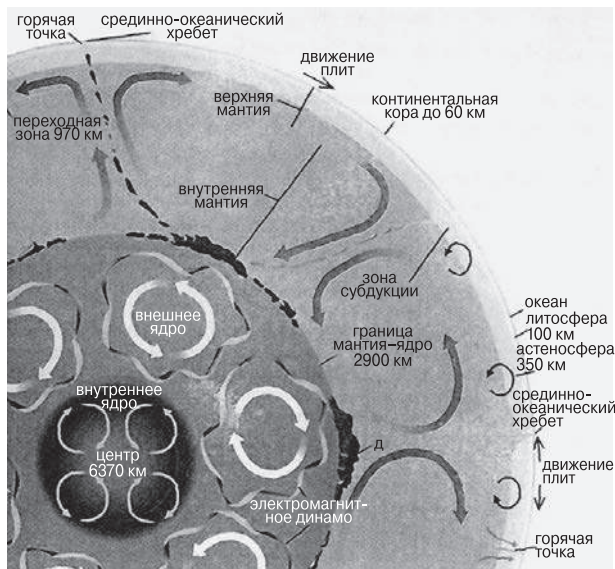


Рис. 2.28. Функционирование глобальных ячеистых систем геосфер Земли (Пауэлл, 1981)

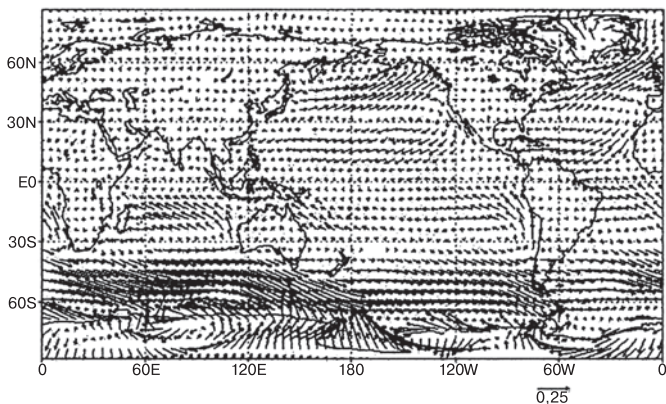


Рис. 2.29. Глобальное распределение напряжения ветра (Па) по поверхности раздела океан-атмосфера (Trenberth et al., 1989).
Стрелка внизу соответствует силе 0,25 Па

структуры можно рассматривать как участки многоугольников, имеющие дуговидные (кольцевидные) очертания за счет соответствующих длин сторон и углов. В определенной степени углы

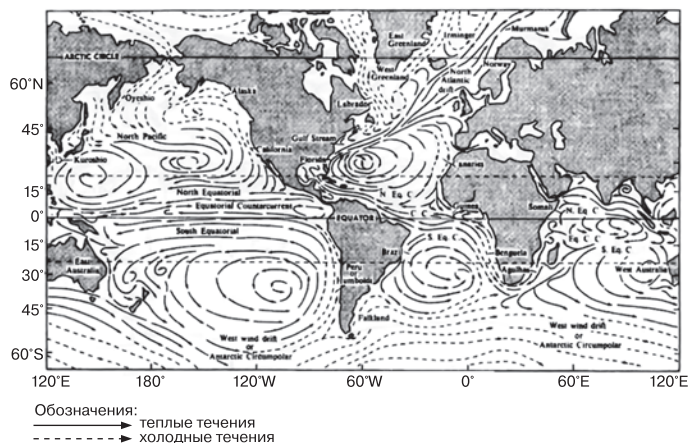


Рис. 2.30. Схема поверхностной глобальной циркуляции океана (Peixoto, Oort, 1992)

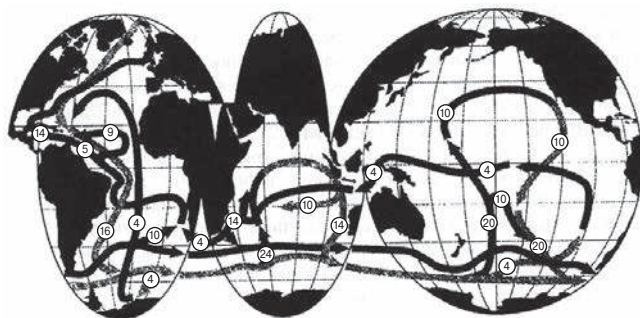


Рис. 2.31. Схема трехмерной глобальной циркуляции океана согласно модели двухслойного потока (Schmitz, 1995; цит. по: Дийкстра, 2007). Темными (светлыми) линиями показаны потоки поверхностной (глубинной) воды. Апвеллинг и даунвеллинг изображены стрелками и точками соответственно

округляются, как бы «дорабатываются» текущими по овражно-балочной сети (связанной с разломно-трещинной сетью) водами, что способствует кольцевому виду ряда объектов в плане. Многие линеаменты можно интерпретировать как совпадающие по направлению стороны ряда ячеек. Они, как правило, контролируются значительными по рангу разрывными нарушениями. Элементы овражно-балочной сети подчеркивают контуры ячеек разных уровней как в стационарном состоянии, так и после оползания блоков, развиваясь по контуру оползшего тела.

Новые представления о геодинамической сети позволяют иначе посмотреть на особенности эколого-геологических опасностей в городах. Это особенно важно, так как урбосфера (развивающаяся при взаимодействии ноосферы с физическими оболочками Земли и биосферой) также проявляет фрактально-ячеистые свойства, что выражается, в частности, в рисунке так называемого глобального каркаса расселения (см. гл. 4).

Дальнейшая разработка фрактально-ячеистой модели геосфер Земли требует большего привлечения концепций геоморфоблоков, геолого-геоморфологической конформности, а также углубленного изучения геосфер с позиций сетевых структур и анализа синергетических эффектов с выходом на конкретное математическое моделирование.

2.7. Кризисные и катастрофические явления в геосистемах

В последние десятилетия в геоморфологии появилась и развивается теория концепции критических состояний, или геоморфологических пороговых значений (Ананьев, 1998). Суть ее заключается в том, что до некоторого момента состояние рельефа можно характеризовать как динамическое (текущее) равновесие, но переход через критические (пороговые) значения некоторых параметров геоморфологической системы сопровождаются изменением, усложнением структуры геоморфологических систем, часто имеющими катастрофический характер. Например, «...установлено, что оползание и обрушение склонов междуречий в умеренном поясе происходит при достижении скорости выпадения атмосферных осадков в 55 мм/сут, при продолжительности выпадения таких осадков 2—3 сут. Эту величину предложено считать индексом опасности» (Ананьев, 1985). Видны все признаки бифуркационной смены режима, а критическое значение скорости выпадения осадков — бифуркационное значение одного из параметров (Чупрынин, 2008).

Для того чтобы создать, например, систему природных охраняемых территорий в регионе, вырабатывается несколько альтернатив в распределении и характеристиках таких территорий, и фактически в предпроектном состоянии общество находится в начале развилки этих альтернатив. Выбор одной из альтернатив и ее реализация означают бифуркационную смену состояния обще-

ства и природы в данном регионе. Здесь у общества существует некоторый интервал времени на обдумывание, в течение которого система находится вблизи развилки, и оно ориентировочно знает, к чему приведет движение по каждому из путей в обозримом будущем. Катастрофы — это класс явлений, в которых в том или ином виде проявляется нелинейность природных систем. Причины и механизмы их возникновения разнообразны. Выделяют три типа природных геокатастроф: вынужденные, бифуркационные и автогеокатастрофы (Чупрынин, 2008).

Вынужденные геокатастрофы возникают в природных и социоприродных системах под воздействием мощных импульсивных внешних факторов, например, при землетрясениях, извержениях вулканов, тайфунах (ураганах), торнадо, цунами, грозах, падениях крупных небесных тел на поверхность Земли. Ввиду большой мощности внешнего воздействия отклик на них оказывается нелинейным. Так, при падении крупного космического тела возникают нелинейные волны большой амплитуды, превышаются критические напряжения и на поверхности появляются разрывы, оплавляется участок Земли. Другой пример — катастрофические последствия мощного грозового ливня. Такие сильные воздействия на природную систему могут вызвать изменения ее внутренней структуры, преобразования в совершенно иную или просто уничтожение системы как таковой. Здесь существенно сказываются нелинейные свойства системы.

При *бифуркационной геокатастрофе* вследствие нелинейности системы возникает катастрофическая смена режима ее функционирования. В частности, такой модели соответствуют массовая гибель животных и людей при засухах, быстрая гибель лесов при медленной смене климатических условий или переход движущейся по каналу воды от ламинарного режима к турбулентному при некотором значении числа Рейнольдса. Оригинальный пример крупной техногенной катастрофы — разрушение Такомского моста вследствие развития автоколебаний при взаимодействии потока воздуха с конструкцией моста (Томпсон, 1985) (рис. 2.32), где число Рейнольдса превысило критическое значение. Как отмечает В.И. Чупрынин (Чупрынин, 2008), именно этот тип катастроф рассматривается в математической теории катастроф (Арнольд, 1990), и здесь представления о катастрофе и бифуркации практически неразличимы. В.И. Арнольд подчеркивает, что когда мы говорим о катастрофах, то имеется свободный выбор между



Рис. 2.32. Разрушение Такомакского моста в 1940 г. — пример техногенной катастрофы бифуркационного типа вследствие недоучета нелинейности эффектов при взаимодействии потоков воздуха и инженерных сооружений (<http://mgssupgs.livejournal.com/465911.html>)

терминами «особенности», «бифуркации» и «катастрофы». Математическая теория катастроф, начиная с работ А. Пуанкаре, а затем Р. Тома изучает только катастрофические явления бифуркационного типа (Чупрынин, 2008).

Автогеокатастрофы подготавливаются и возникают внутри системы вследствие ее нелинейности. Происходит накопление и возрастание напряжений, энергии, вещества (поступающих извне), возрастание негативных факторов или иных характеристик в зависимости от вида системы. Это возрастание происходит до некоторого критического уровня, после которого срабатывает нелинейный механизм, производящий разгрузку накопленного. При этом скачкообразно изменяются некоторые характеристики системы, что из всех рассматриваемых здесь типов катастроф прогноз автогеокатастроф во многих случаях имеет большую вероятность. Ярким примером катастроф этого типа являются подвижки в пульсирующих ледниках (Чупрынин, 2008).

2.8. Моделирование глобального геопроцесса — цунами

Хорошим примером рассмотрения геологических явлений с нелинейных позиций представляется изучение цунами. Глобальное восприятие этого явления оформилось после известного катастрофического события 2004 г. в Юго-Восточной Азии. Сегодня очевидно, что его можно интерпретировать как глобальное, причем комплексное — геологическое, вызвавшее множество экологических, социальных, экономических, политических последствий для всего земного шара. Пострадали граждане десятков государств разных континентов, в ликвидации последствий участвовало все мировое сообщество.

Проблемам землетрясений и цунами посвящено множество исследований. Цунамигенные землетрясения возникают в так называемых зонах субдукции из-за внезапного высвобождения упругой энергии, накопленной здесь в результате трения литосферных плит при пододвигании одной под другую (субдукция) и (или) при их столкновении (коллизия). За геологически краткие интервалы времени (порядка десятков и сотен лет) здесь могут накопиться колоссальные запасы упругой энергии, соответствующие предельно высоким напряжениям, близким к пределу прочности скальных пород.

Дальнейшее развитие событий носит явно синергетический характер и представляется следующим образом. «Когда достигается предел прочности пород, в зоне наибольшего трения (соответствующей поверхности контакта между пододвигающейся плитой и подошвой островодужного блока) возникает разрыв, который быстро распространяется вдоль нагруженной области контактной поверхности, т.е. происходит сильнейшее землетрясение, при котором фронтальная подводная часть островов практически синхронно “выстреливает” в сторону океана, как гигантская упругая пружина. При этом вертикальная компонента мгновенного смещения пород составляет несколько метров, что создает внезапный удар со стороны дна по огромному объему водной толщи. На поверхности океана возникает динамический “горб” высотой около 10 м и шириной порядка 100 км. Это начальное возмущение и становится причиной возникновения цунами» (Лобковский, 2005). Иногда тыловая область подводной части островодужного выступа при сбросе напряжений может погрузиться на несколько метров, создавая на поверхности воды перед «горбом» небольшую

впадину. В этом случае при достижении побережья волне цунами будет предшествовать неожиданный отлив.

С позиций теории нелинейных волн краткий обзор проблемы цунами дан, например, в (Пелиновский, 1982, 1989, 1996) — перечислены некоторые случаи крупных цунами, обсуждается место цунами среди других стихийных бедствий, описана работа службы цунами. Более подробно обсуждается роль нелинейных и дисперсионных эффектов при распространении волн цунами. Описание современного состояния проблемы наката морских волн на берег с общезначимых позиций приведено в статье (Пелиновский, 1981).

Сложность ситуации кроется прежде всего в особенностях строения подводных частей островных дуг или активных окраин континентов, взаимодействующих с пододвигаемой под эти структуры океанической литосферой. В 1980-е гг. в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН была разработана так называемая клавишная модель цунамигенных землетрясений в зонах субдукции (Лобковский, 1988, 2005) (рис. 2.33, 2.34). Как показывают многочисленные геоморфологические и геолого-геофизические данные, указанные структуры имеют ярко выраженное сегмен-

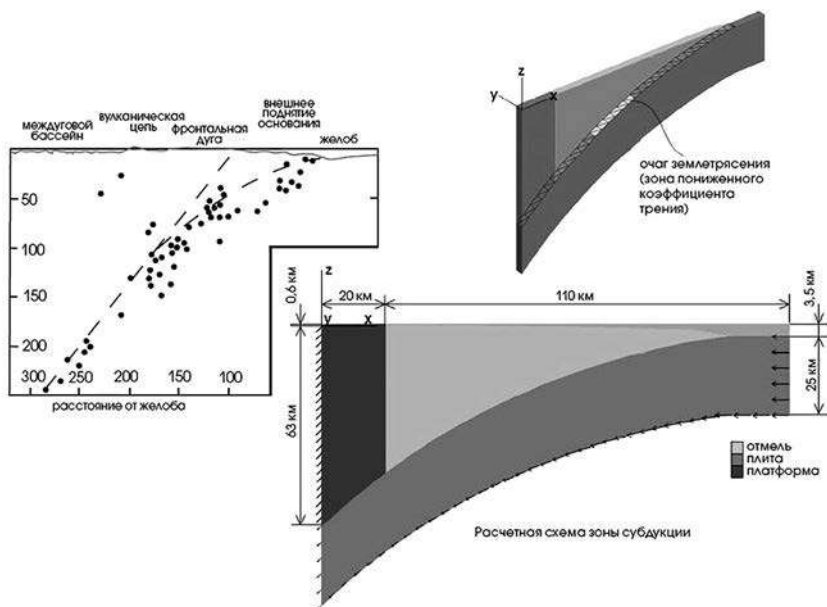


Рис. 2.33. Накопление упругой энергии в зонах субдукции (Лобковский, 2005)

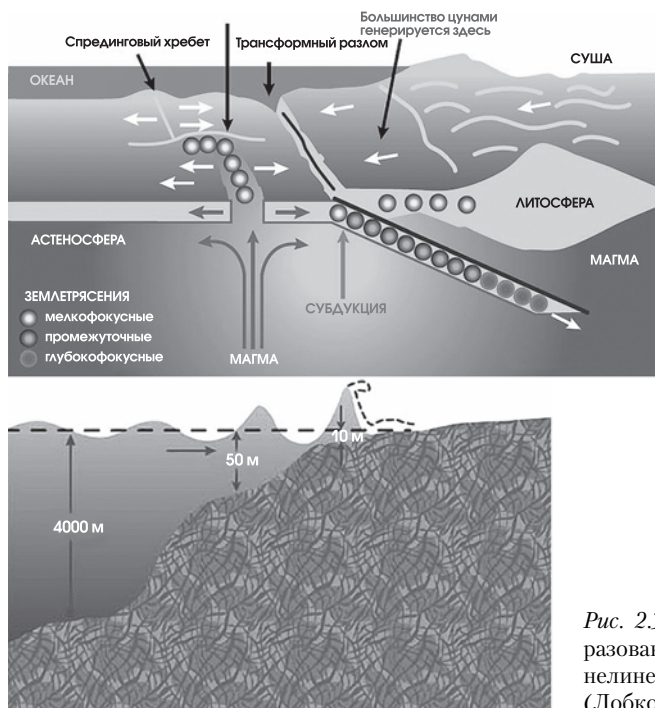


Рис. 2.34. Механизм образования цунами как нелинейного эффекта (Лобковский, 2005)

тированное строение, т.е. края островных дуг и активных континентальных окраин разбиты поперечными разломами на блоки-«клавиши» с характерным размером около 100 км. Такая «нарезка» на блоки фронтальных частей островных и материковых окраин структурно определяет размер очага сильного землетрясения. В основном такие очаги связаны с деформируемыми и «стреляющими» при сбросе напряжений блоками-«клавишами», но иногда длина очагов сильнейших землетрясений соответствует нескольким смежным блокам, в которых происходит одновременная разрядка накопленной упругой энергии. В декабре 2004 г. в Индийском океане одновременно «выстрелило» сразу 8 или 10 блоков-«клавиш» Зондской островной дуги, и этот мощный «аккорд» вызвал образование громадного очага землетрясения и как следствие — появление гигантского цунами.

Клавишная модель сегодня служит «механико-математической» основой для количественного описания подобных природных катаклизмов. Численное решение уравнений модели позволяет достаточно точно описывать процесс накопления упругой энергии

в системе блоков-“клавиш” и ее разрядку в моменты сильнейших землетрясений для любых конфигураций островных дуг и фронтальных блоков-“клавиш”» (Лобковский, 2005).

На этой основе сегодня производятся попытки долгосрочного (с шагом порядка 100 лет) и возможно среднесрочного (несколько лет) прогнозирования. Так, Л.И. Лобковский, А.М. Никишин и В.Е. Хаин (2004) прогнозировали в ближайшие 10–20 лет катастрофическое цунамигенное землетрясение в районе Токио по результатам анализа напряженности Токийского блока, которая подходила к критическому состоянию. Прогноз, как известно, оправдался. В Японии к проблеме землетрясений относятся очень серьезно (например, некоторые АЭС строятся из расчета на сейсмический удар в 12 баллов), но принятых на сегодняшний день мер оказалось недостаточно. Сильнейшее землетрясение 11 марта 2011 г. вызвало мощное цунами (рис. 2.35) с катастрофическими последствиями глобального значения (авария на атомной электростанции «Фукусима-1» и т.д.).

Четких критериев краткосрочного (сутки, часы) прогноза сегодня не существует. Наблюдения над поведением животных, проводимые с давних времен, пока не имеют научной базы, хотя китайцам несколько раз удалось предсказать землетрясения по поведению рыб и змей. Трудности краткосрочного прогноза связаны именно с нелинейностью происходящих процессов. Основная трудность



Рис. 2.35. Фронт цунами продвигается вглубь территории Японии 11.03.2011

краткосрочного прогноза сильного землетрясения заключается в том, что когда сейсмогенный блок накопил критический уровень упругой энергии, то практически любое очень малое возмущение среды может сыграть роль триггера, или спускового крючка, вызывающего срыв блока, сопровождаемый землетрясением. Причем в роли такого возмущения могут выступать самые разные природные или техногенные факторы, например изменение атмосферного давления, изменение режима грунтовых вод, колебания среды, вызванные техногенной деятельностью, и т.д. Тем не менее, задача краткосрочного прогноза не кажется безнадежной, так как обычно развитие макроразрушения предваряется процессом микроразрушений в каком-то объеме среды, что может проявляться в виде различного рода геофизических аномалий, своеобразного акустического гула или других кратковременных явлений, которые, возможно, животные улавливают как сигналы опасности.

2.9. Ритмичность глобальных геофизических процессов в истории эволюции Земли

Объектом работы геолога часто являются *ритмично построенные толщи* горных пород (Габдуллин, Иванов, 2002, и др.) (рис. 2.36), которые на сегодняшний день встречаются в отложениях фанерозоя и докембрия почти повсеместно. Очевидно, что они представляют собой «каменную летопись» нелинейных процессов прежде всего глобального масштаба в истории Земли. В связи с этим изучение особенностей ритмичности глобальных геопроцессов имеет важнейшее теоретическое и практическое значение прежде всего для понимания их механизмов и прогнозирования (рис. 2.37). Однако несмотря на повышенное внимание к ритмичности толщ, изученность их на сегодняшний день является недостаточной. Например, остается проблематичной природа ритмов, сложенных карбонатными породами (разнообразными известняками, мелями, мергелями и т.п.). Часто для одних и тех же разрезов дается их различная интерпретация с привлечением ряда противоречащих друг другу климатических и палеогеографических моделей (Габдуллин и др., 2008, 2009).

Интересен понятийный аппарат, используемый в науках о Земле по этой тематике, существенно отличный от терминологии теории колебаний. В научной литературе существует ряд различных определений процесса формирования чередующихся слоев (ритмичность, периодичность, цикличность) и результата этого



Рис. 2.36. Ритмично построенные толщи — запись нелинейных процессов геологического прошлого в земной коре (Алтай, фото И.А. Яшкова)

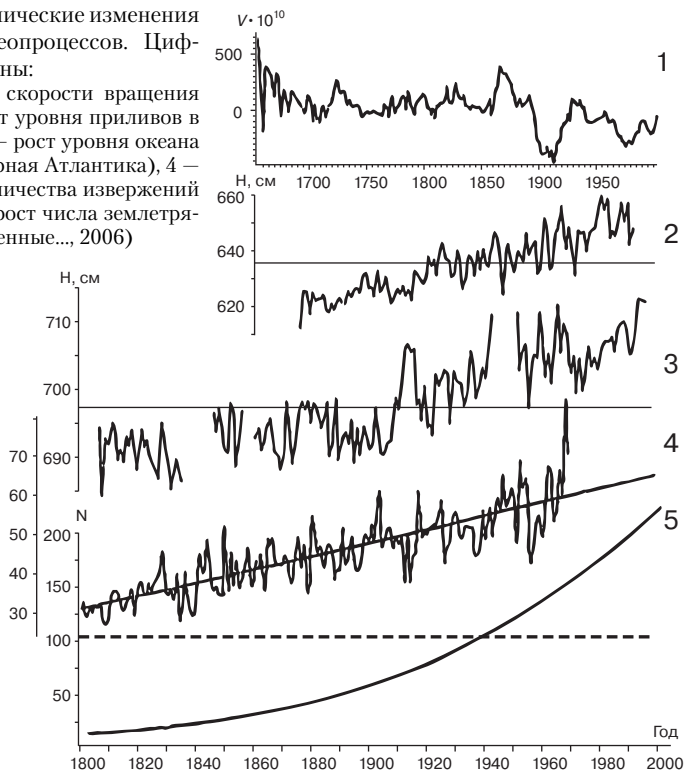
процесса (ритм, ритмит, периодит, цикл, циклит и т.д.). Ритмичность — многократная закономерная повторяемость слоёв определённого состава. Каждый ритм характеризуется более или менее постоянным для данной толщи числом слоёв, сменяющих друг друга в одном неизменном порядке и более или менее постоянным значением мощности.

Ритм (греч. *rhythmos*) представляет собой закономерное чередование двух и более слоёв в разрезе, границами между которыми служат естественные поверхности подошвы, кровли, размыва или прочие выделяемые поверхности на основе изменения определённых свойств пород (механических, химических, физических и т.д.). В некоторых случаях поверхность раздела (например, типа «hard ground») также может периодически встречаться в разрезе и маркировать границы ритмов. При постепенных, нерезких границах элементов ритмов выделение ритмов возможно проводить по профилю выветривания. Элемент ритма (ЭР) — один из двух или более закономерно чередующихся составных частей ритма.

Помимо понятия «ритм» существует понятие «цикл» (греч. *kyklos*), господствующее в зарубежной литературе. На русский язык его лучше перевести как «циклит» — комплекс слоёв, свя-

Рис. 2.37. Циклические изменения глобальных геопроцессов. Цифрами обозначены:

1 — снижение скорости вращения Земли, 2 — рост уровня приливов в Куксхавене, 3 — рост уровня океана в Бресте (Северная Атлантика), 4 — увеличение количества извержений вулканов, 5 — рост числа землетрясений (Современные..., 2006)



занных более тесно друг с другом, чем со смежными комплексами, от которых они отделены границами «большой» резкости. В этом случае циклит — продукт цикличности. Соответственно синонимом ритмичности становится слово «циклитовость», часто употребляемое В.Т. Фроловым (1995). Цикл как элемент разреза может обозначаться как «литоцикл». А.А. Трофимук и Ю.Н. Кародин (1977) определяют элементарный циклит как простейшую слоевую систему, элементы (слои) которой, следуя друг за другом или чередуясь, связаны между собой (сонахождением или сопроисхождением), образуют единое целое, т.е. не делимое на более дробные целые части (циклиты). Развивая терминологию цикличности и определяя ранговый статус циклитов, эти авторы предложили называть элементарные циклиты — циклитанами, мезоциклиты — просто циклитами, мегациклиты — циклитинами, суперциклиты — циклититами.

Таким образом, термин «цикл» представляет собой очень широкое понятие, и его не следует употреблять как синоним «циклита». Существуют циклы Бертрана, Миланковича, Уилсона, Фишера-Артура, эксцентриситета, эклиптики, прецессии, растворения, разбавления и биопродуктивности. Таким образом, слово «цикл» несёт огромную смысловую нагрузку. Интересное толкование данного термина можно встретить у зарубежных исследователей. Согласно В. Шварцахеру (Schwarzacher, 1993), седиментационные циклы подразделяются на секвентные (регулярное изменение литологии пород), мощностные (регулярные вариации мощностей чередующихся слоёв) и временные (регулярное изменение времени формирования слоёв). Примером циклической последовательности (периодической функции) может являться синусоида. Комбинация периодических функций есть квазипериодическая функция. Астрономические циклы (эксцентриситета, эклиптики, прецессии) являются периодическими последовательностями, а результат их взаимодействия имеет квазипериодический характер и получил название «циклы Миланковича».

Геологическим циклам затруднительно дать физико-математически строгое определение, хотя существовали определения секвентных циклов как последовательностей типа ABCABC... или ABCBABC... Циклы любого рода генерируются механизмом, называемым осциллирующей системой. Циклы накопления осадков на дне бассейна (седиментационные циклы) отражают условия окружающей среды, являющейся осциллирующей системой. Осциллирующая система динамична — это система переменных параметров, описывающих условия окружающей среды в любой момент седиментации. Самым главным признаком этой системы является то, что эти переменные должны взаимодействовать друг с другом таким образом, чтобы генерировались повторяющиеся осцилляции. Определение седиментационных циклов через осциллирующую систему, по мнению В. Шварцахера, является «важным логическим шагом», позволяющим классифицировать их на аллоциклы и автоциклы. Автоциклы генерируются внутри осциллирующей системы, а аллоциклы формируются под воздействием осциллирующей системы, но за её пределами. Таким образом, седиментационные циклы являются аллоциклами, так как возникают под воздействием приливов и климатических флуктуаций. Примером автоциклов может считаться цикличность отложений меандрирующего русла реки.

Менее употребляемый и синонимичный первым двум терминам «периодит» (*periodite*) — некий результат периодического процесса (периодичности, по Н.Б. Вассоевичу (Вассоевич, 1978 и др.)), — более или менее регулярной, равномерной повторяемости какой-либо реалии (явления, предмета) во времени и/или в пространстве через равные или близкие по величине интервалы времени). В этом случае акцентируется внимание на равенстве времени образования элементов ритма. Имеются и другие определения этого термина. Например, периодит — это постепенно и периодически изменяющиеся осадочные последовательности; или периодит — чистый тип циклических осадков с определёнными интервалами образования циклов. Существует и другое значение этого термина. Периодиты, или известково-мергельные циклы — генетический тип циклитов, который близок по длительности (около 41 000 лет) к изменениям наклона эклиптики и, таким образом, вероятно, имеет астрономическую первопричину (Фролов, 1995).

Отметим, что в изучении геоцикличности создалась сложная ситуация с терминологическим аппаратом. Особо она обострилась в 70-е гг. XX в., когда на Всесоюзной конференции по цикличности в 1975 г. и после нее произошел «терминологический взрыв» — было предложено множество разнообразных новых терминов: «цикломинералон», «цикломинерон», «циклостратон», «циклофармон», «циклосферон» (Ю.П. Смирнов), «циклосома» и «циклома» (Н.Б. Вассоевич), «циклоп», «пульсит» (С.Л. Афанасьев), «циклолитон» (В.Е. Хаин), «циклолита» (Н.Ф. Балуховский), «комплекс-цикл» (П.П. Тимофеев), «климатолит» (В.А. Зубаков) и др. (Геоцикличность..., 1976; Балуховский, 1975; Карогодин, 1974, 1980; Вассоевич, 1977). А.А. Трофимук и Ю.Н. Карогодин применили также термины «циклокомплекс», «элементарный циклит» и «циклолитан» (Ботвинкина, Алексеев, 1991). Со временем стали редко употребляться многие из этих терминов, а также некоторые ранее введенные понятия, например «циклотема» (Weller, 1930). Многие обозначенные в литературе термины трудно произносимы, громоздки и не всегда однозначно и корректно переводимы на иностранные языки.

На данный момент практически общеупотребимыми терминами являются «ритм», «цикл» и «периодит». Разные научные школы используют различные термины. В.Т. Фролов настаивает на применении термина «циклит», предложенного С.Л. Афана-

сьевым (1974). «Ритм» встречается в работах В. Рикена, С. Саврда и Дж. Боттье. А. Спренгер и Д. Тен Катэ используют термин «периодит», В. Шварцахер — «цикл». Ввиду сложности и неоднозначности трактования понятия «циклит», неодинаковой скорости седиментации при формировании менее карбонатных и более карбонатных элементов ритма часто используют именно термины «ритмичность», «ритм». Ритм — это литифицированные, закономеренно чередующиеся породы, сформировавшиеся под воздействием седиментационных циклов и (или) диагенеза.

Ритмы в различных типах разрезов имеют глобальное распространение и могут быть наблюдаемы во всех районах Земли. Например, карбонатные ритмы являются одним из вариантов ритмов осадочных пород и представлены чередованием карбонатных и терригенно-карбонатных пород. Это мергели, карбонатные глины, известняки, мел, характерные для карбонатных платформ (например, отложения норийского яруса в Австрийских Альпах), пелагических и гемипелагических обстановок, озёрных отложений — подавляющее большинство известных докембрийских и фанерозойских (юрских, меловых) карбонатных ритмов из разрезов Европы, Азии, Северной Америки, Австралии.

При изучении ритмичности разрезов земной коры может быть использовано большое число разнообразных методов, дающих наилучший результат в решении конкретных задач при их комплексировании. По В.Т. Фролову (Фролов, 1995), изучение циклитов (рис. 2.38) включает: 1) процедуру опробования каждого элемента цикла и даже слойка с прицелом на оценку изменения свойств пород по телу циклита; 2) сбор максимально возможного объема количественных данных, особенно по толщине слоев для обнаружения «вложенной», более мелкой цикличности; 3) зарисовка и фотографирование циклитов. Зарубежные исследователи придерживаются аналогичной схемы изучения ритмичных толщ. Отобранные образцы подвергаются комплексному исследованию, включающему основные петрографические, химические и петромагнитные методы. Следующим шагом является генетическое истолкование данных изучения — выяснение генетического типа циклита. Генетическое истолкование облегчается при прослеживании циклитов на площади, при построении или наличии ранее созданных фациально-палеогеографических карт.

Большое значение для исследования и интерпретации природы ритмичности имеют *методы математического (статического) изучения цикличности*. Компьютерные методы математической

статистики, основанные на разложении периодических функций в ряды Фурье и Уолша (эти методы относятся к категории линейных), подсчитывают вероятную связь флуктуаций определенных параметров по разрезу с астрономическими циклами Миланковича. При наличии этой связи компьютер идентифицирует тип цикла (прецессии, эклиптики и эксцентриситета) и их количество в рассматриваемом разрезе.



Рис. 2.38. Один из геологических разрезов, отражающих цикличность глобальных процессов в меловом периоде, детально изученных авторами комплексом описанных методик (Волгоградское Поволжье). Хорошо видна система современных субвертикальных фрактальных эрозионных форм рельефа

При исследованиях разрезов на закономерность повторения литологических компонент (элементов) ритмов и вариаций различных параметров одновременно с определением времени формирования ритмов часто комплексированы три метода. Первый — восстановление свободного ритморазреза с последующим определением времени формирования ритмов по шкале времени путем деления продолжительности временного интервала на соответствующее ему число ритмов. Второй — подсчет среднего числа осцилляций параметров по разрезу с последующим делением продолжительности интервала на число пиков. Третий — спектраль-

ный Фурье-анализ (разложение в ряд Фурье) периодического распределения замеренных параметров. Разделяют математические методы анализа ритмичности (метод Бюи-Балло), цикличности (метод Маркова) и периодичности (метод Фурье). Одним из методов анализа периодичности является метод Уолша (Schwarzacher, 1993). В последнее время (Sbignev, 1997) высказывается точка зрения о целособразности комбинативного Марков-Миланкович (Фурье) подхода в циклостратиграфии. Выбор метода Фурье может быть обусловлен, например, задачей оценки вероятной связи ритмичных флуктуаций параметров с циклами Миланковича путем анализа частоты распределения точек экстремума на осцилляционных кривых параметров. Необходимыми «граничными» условиями данного метода являются: 1) ритмичное распределение замеренных параметров в разрезе; 2) обильная фактологическая база (не менее 200 образцов или замеров); 3) равенство временного интервала между точками с результатами измерений (Габдуллин, Иванов, 2002).

В.Е. Хаин и Э.Н. Халилов (2009) принципиально различают категории «волновых» и «циклических» геопроцессов, в том числе глобальных. *Волновым*, по предложенному ими определению, является физический процесс, сопровождающийся знакопеременными отклонениями физической величины от условно нулевого (среднего) значения, в котором равные по амплитуде положительные и отрицательные отклонения являются равнозначными по энергии, но противоположными по знаку. В природе существует масса примеров, когда волновые процессы порождают циклические и наоборот. Например, собственные колебания Земли, имеющие волновой характер, могут оказывать влияние на изменение слабой (фоновой) сейсмичности, вызывая определенную цикличность в ее проявлении. В то же время цикличность тектонических напряжений (например, вызванная цикличностью скоростей движений литосферных плит) может вызвать образование длиннопериодных тектонических волн (волновой процесс). *Циклическим* является физический процесс, сопровождаемый периодически сменяющимся повышением и понижением физической величины одного знака относительно нулевого (минимального) значения (табл. 2.2) (Хаин, Халилов, 2009).

«Если циклические процессы обычно отражают повышение и понижение определенных параметров (числа землетрясений, извержений вулканов, солнечных пятен, сейсмической энергии), то волновой процесс по своей сути означает смену знака выделяю-

Таблица 2.2

**Глобальные природные геопроцессы волнового и циклического характера
(Хаин, Халилов, 2009)**

Циклические процессы	Волновые процессы
Солнечная активность	Электромагнитные, сейсмические, акустические излучения
Колебания уровней морей и океанов	Квадрупольное знакопеременное изменение метрических параметров тел в поле проходящей гравитационной волны
Сейсмическая активность	Лунно-солнечные приливы и отливы
Вулканическая активность	Знакопеременные вертикальные тектонические движения
Периодичность в проявлении цунами	Периодические изменения радиуса Земли
Вариации выпадения метеосадков	Вариации длительности земных суток
Процесс седиментации	Знакопеременные вариации напряженного состояния земной коры (сжатие-растяжение)

щейся энергии в рассматриваемом процессе с положительного на отрицательный и наоборот. В отличие от циклических процессов, волновые процессы несут равную по величине, но противоположную по знаку энергию. Например, электромагнитные, акустические или гравитационные волны. Таким образом, оба полупериода волны, как положительный, так и отрицательный, несут в себе равную энергию, вызывающую соответствующую реакцию среды на эти процессы. Между тем, в циклических процессах максимум цикла означает максимальное количество привносимой в систему энергии, а минимум циклов — минимальное. В циклических процессах мы имеем дело с процессами, обладающими только положительной составляющей. Естественно, что не может быть выделено отрицательное количество сейсмической энергии, так же как не может произойти отрицательное число землетрясений и извержений вулканов. Поэтому, рассматривая и анализируя порой волновые процессы в качестве циклических, исследователи неверно трактуют полученные результаты и упускают из вида физический смысл механизма того или иного процесса» (Хаин, Халилов, 2009).

2.10. Глобально-климатические модели

Климат Земли зависит как от космических, так и от планетарных факторов. Параметры глобальной климатической системы Земли в геологическом времени претерпевали постоянные изменения циклического характера с ярко выраженными нелинейными эффектами (рис. 2.39, 2.40). Кроме того, сегодня очевидна тесная взаимосвязь климата с глобальными процессами в гидросфере, которые в свою очередь нелинейно проявляли себя в геологическом времени (рис. 2.41). Известные в настоящее время концепции объединяют в две группы: астрономо-физические и геолого-географические (Габдуллин и др., 2005). Все они обладают общепланетарным действием. Каждой концепции соответствует определенная модель разной степени завершенности и применимости математического аппарата.

Астрономо-физические концепции (модели) связывают вариации климата с колебаниями количества и состава солнечной радиации. Их разделяют на две подгруппы. Первая подгруппа (па-

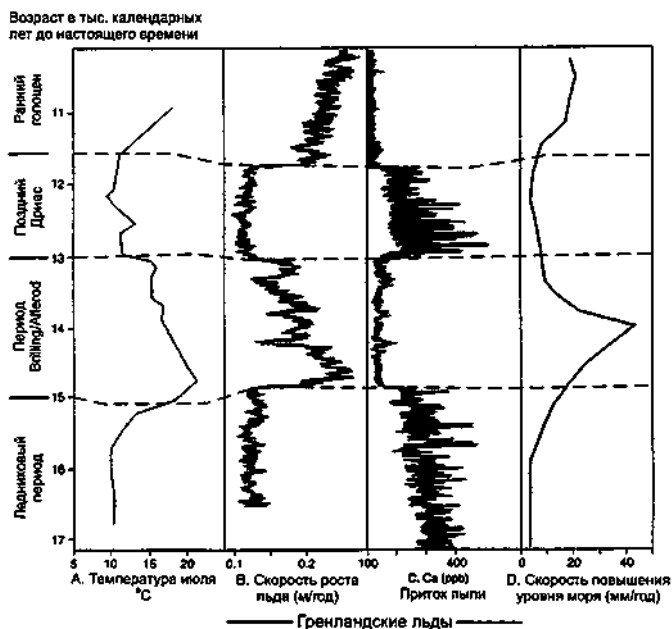


Рис. 2.39. Изменение параметров глобальной климатической системы в течение времени Позднего Дриаса (Дийкстра, 2007)

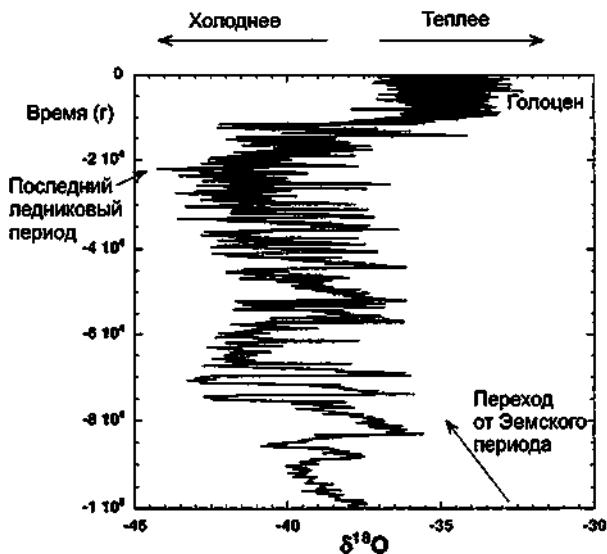


Рис. 2.40. Изотопная кривая для последнего межледникового и последнего оледенения — изменения на одну единицу соответствует изменению температуры около 2 °С (данные Johnsen et al., 1997).

Источник: Дийкстра, 2007.

радиigma М. Миланковича) исходит из принципа постоянства солнечной радиации и переменности положения поверхности Земли по отношению к потоку солнечных лучей. Вторая подгруппа связана с изменением излучающей способности Солнца.

Астрономо-климатическая концепция (модель) М. Миланковича

К первой подгруппе относится так называемая парадигма Миланковича, которая исходит из принципа постоянства солнечной радиации и переменности положения поверхности Земли по отношению к потоку солнечных лучей.

Представления о неравномерном распределении солнечной радиации по поверхности Земли в связи с изменениями элементов земной орбиты впервые были предложены английским астрономом Д. Кроллом в 1875 г. Он высказал предположение о связи периодических изменений положения и объёма полярных ледовых шапок, обусловленных колебаниями климата, с вариациями эксцентриситета земной орбиты и наклоном эклиптики планеты. Широкую известность этой гипотезе придали труды М. Миланковича, впоследствии поддержанные В. Кеппеном и А. Вегенером (Синицын, 1980). Изменение распределения солнечной радиации

Эвстатические циклы в фанерозое

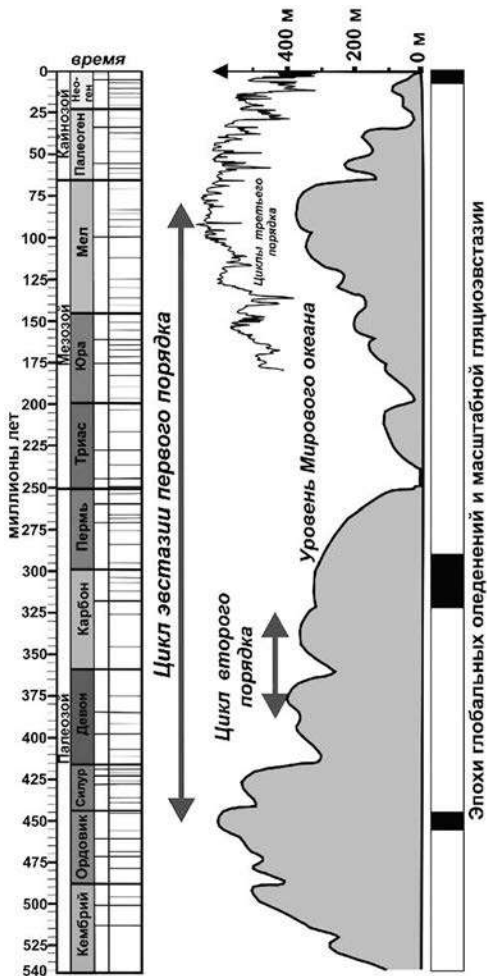


Рис. 2.41. Глобальный гидросферный процесс изменения уровня океана в истории Земли (рис. А.М. Никишина, МГУ).
Источник: Глобальные социоприродные..., 2011

по поверхности планеты связывалось с периодическими изменениями наклона земной оси (циклы наклона эклиптики), эксцентриситета земной орбиты и прецессии оси вращения Земли (время перигелия).

Теория космической цикличности, вызывающей климатические флуктуации, была впервые обоснована в работе М. Миланковича (Миланкович, 1939). Вариации оси вращения Земли и элементов земной орбиты влияют на сезонное и широтное распределение солнечной радиации по поверхности нашей планеты. Это распределение контролируется вариациями следующих астрономических параметров:

прецессии, наклона эклиптики и эксцентриситета земной орбиты. Вариации эксцентриситета орбиты Земли влекут за собой изменение количества солнечной энергии. Возмущения двух других параметров приводят к широтному перераспределению солнечной радиации. Флуктуации инсоляции, определяющей тепловое состояние земной поверхности, изменяют 1) интенсивность испарения и конденсации атмосферной влаги; 2) силу и направление ветров и морских течений; 3) продолжительность зимы и лета; 4) положение зоны апвеллингов. Таким образом, имеют

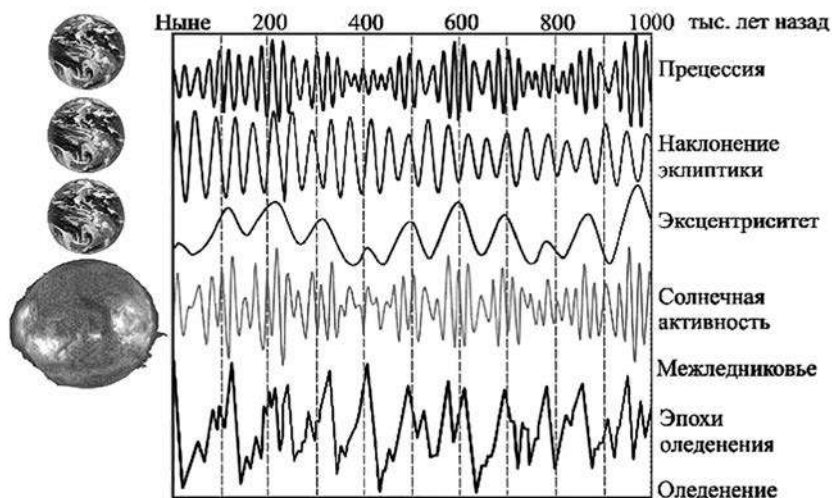


Рис. 2.42. Астрономо-климатические циклы М. Миланковича и циклы солнечной активности вызывают циклическую смену фаз межледниковья и оледенения.

Источник: Глобальные социоприродные..., 2011

место флуктуации тёплого и холодного, а также сухого и влажного типов климата (рис. 2.42).

Данные периодические изменения элементов земной орбиты М. Миланкович рассчитал для избранных широт на весь четвертичный период. В результате этих расчётов появилась кривая колебаний величин солнечной радиации, впоследствии сопоставленная Ф. Цейнером в 1963 г. с хронологией четвертичного периода. Пики на кривой М. Миланковича, отвечающие периодам с прохладным летом, сопоставлялись с ледниковыми эпохами, а пики, отвечающие периодам с тёплым летом, — с межледниковыми эпохами. Данная корреляция была настолько убедительна, что многие исследователи (А. Кеппен, А. Вегенер и др.) приняли кривую радиации М. Миланковича за основу геологического летоисчисления.

Скорость вращения Земли и траектория орбиты не были постоянными в геологической летописи. А. Бергером в 1989 г. были математически высчитаны величины продолжительности астрономических циклов с учётом уменьшения продолжительности дня, постоянно возрастающего расстояния между Землёй и Луной, а также изменений инерции движения космических тел за последние 400 млн лет. Следует обратить внимание, что, во-первых,



Милутин Миланкович (1879–1958) — сербский климатолог. Родился в г. Даль (Dalj, ныне Хорватия), получил образование в Вене и работал инженером-строителем. В 1904 г. поступил в Белградский университет. Во время Первой мировой войны служил в Генеральном штабе сербской армии и был захвачен в плен австро-венгерскими войсками. Отбывая заключение в Будапеште, имел возможность продолжать свои исследования — он большую часть войны разрабатывал теорию периодичности ледниковых периодов. (по www.elementy.ru)

исследователь выделил короткие и длинные циклы наклонения эклиптики; во-вторых, продолжительность циклов наклонения

ekliптики в раннем силуре приближается к продолжительности циклов современной прецессии.

Ряд исследователей четвертичного периода (астрономы и климатологи) обратили внимание научной общественности на некоторые недостатки парадигмы М. Миланковича. Климатические последствия этих изменений должны были проявляться поочередно в северном и южном полушариях, но интервалы потепления и похолодания (в том числе и оледенения) носили общепланетарный характер. Отмечалось также несовпадение основных событий четвертичного периода, рассчитанных по кривой Миланковича, и данных, полученных методом ленточных глин и изотопным методом. Колебания солнечной радиации, вызванные изменениями элементов земной орбиты, должны были иметь место и в дочетвертичное время. Однако в палеогене и неогене отсутствуют признаки оледенений (Синицын, 1980). Позднее ряд американских астрономов установили, что изменения солнечной радиации невелики и, следовательно, не имеют большого климатического значения. Вариации температуры оценивались приблизительно в 2° , что недостаточно для инициации оледенения. В расчётах М. Миланковича игнорировались динамические процессы атмосферы и удлинение продолжительности суток в результате замедления вращения земли под влиянием лунных и солнечных приливов (на 0,0014–0,0024 сек. в столетие). Например, в начале палеозоя сутки были на 2,5 ч. короче современных. В последнее время выска-

зываются предположения, что климатические флуктуации могут быть вызваны не столько цикличностью Миланковича, сколько эволюцией климатической системы Земли.

Результаты изучения мезо-кайнозойских разрезов скважин глубоководного бурения и ритмично построенных фанерозойских толщ обнаруживали связь с астрономическими циклами Миланковича. На данный момент модель М. Миланковича доминирует среди прочих астрономо-физических моделей изменений климата. В случае, когда установлено, что время формирования выделенных типов ритмов отвечает циклам прецессии, эклиптики и эксцентриситета, климатическая или эвстатическая модель (Габдуллин и др., 2005) формирования периодитов может трансформироваться в модель М. Миланковича. В последнее время высказываются предположения о «солнечных циклах Миланковича», т.е. циклах прецессии (95 млн лет), эклиптики (190 млн лет) и эксцентриситета (570 млн лет) орбитальных параметров Солнца.

Гипотеза Э. Эпика основана на допущении, что при развитии звезды, подобной Солнцу, переход водорода в гелий в её недрах

Эрнст Юлиус Эпик (23.10.1893—10.09.1985) — эстонский астроном. Учился в Московском университете. В 1916 г. заведовал обсерваторией в Ташкенте. С 1921 г. — в Эстонии, работал в обсерватории Тартуского университета (с перерывом в 1930—1934 гг.; работал в Гарварде). В 1944 г. перед наступлением советской армии бежал в Гамбург, где в 1945—1947 гг. преподавал в созданном здесь Балтийском университете. Оттуда перебрался в Великобританию и провел оставшиеся 40 лет жизни в Северной Ирландии. В 1948—1981 гг. работал в обсерватории города Арма, некоторое время был ее директором.

Свою первую книгу «Солнце по новейшим исследованиям» опубликовал на русском языке еще в 1919 г. в Москве. В 1922 г. он сделал прогноз относительно встречаемости вулканических кратеров на поверхности Марса, подтвержденный наблюдениями марсоходов спустя полвека. Основной вклад Эпик внес в исследование малых объектов Солнечной системы, в частности, астероидов и комет. В 1932 г. он выдвинул гипотезу о происхождении комет Солнечной системы из состоящего из малых объектов облака, вращающегося вокруг Солнца по удаленной орбите, в 1950-е гг. эту гипотезу развил Ян Хендрик Оорт, и это явление получило название облака Оорта (по www.dic.academic.ru).



должен создавать зоны неустойчивости и перемешивания, что приводит к временному ослаблению солнечного излучения, т.е. к похолоданию. После восстановления равновесия внутри Солнца интенсивность солнечной энергии возрастает (потепление). Основным недостатком данной гипотезы является отсутствие каких-либо наблюдений и теоретических расчётов, доказывающих сам факт и периодичность «мерцания» Солнца. Периодичность солнечной активности оценивается разными авторами в 70 или 200 лет, что находит отражение в климатических флуктуациях, запечатленных в годовых кольцах современных и ископаемых деревьев.

Гипотеза Ф. Нольке. Суть данной гипотезы заключается в том, что Солнечная система периодически встречает на своём пути туманности. В периоды прохождения наиболее тёмных областей туманностей часть солнечной радиации поглощается, так и не достигнув Земли, в результате чего температура земной поверхности понижается и наступает оледенение. Если туманность состоит из сгущений и прозрачных промежутков, то эпохи оледенения разделяются эпохами межледниковья. Предложенная в 1909 г. Нольке гипотеза на данный момент несостоятельна, так как доказано, что эффект поглощения солнечной радиации межзвёздным газом на таком маленьком отрезке, как радиус Земной орбиты, незначителен.

Гипотеза П.П. Предтеченского. В 1950 г. им было предположено, что солнечная активность через конденсационные процессы оказывает влияние на основные механизмы циркуляции атмосферы: западно-восточный перенос и меридиональный обмен. При усилении солнечной активности циркуляция в атмосфере возрастает. Экваториально-тропическая зона расширяется, но средняя температура в ней снижается вследствие возрастающей облачности. Полярные области расширяются за счет адвекции тёплых воздушных масс более низких широт. Зоны умеренного климата сокращаются. Межзональный обмен воздушных масс ослабевает, и градиент температуры экватор-полюс уменьшается, особенно в зимнее время. Климат во всех циркуляционных поясах становится менее континентальным и однообразным на больших пространствах. Крайние типы климатов, пустынный и арктический, исчезают.

При ослаблении солнечной активности преобладающими становятся процессы стационарного типа. Зоны умеренных широт достигают максимального развития, а другие зоны сокращаются.

Меридиональный обмен ослабевает, и абсолютно преобладающим становится западно-восточный перенос. Континентальность климата возрастает, а градиент температуры экватор- полюс достигает максимального значения. Контрастность климатических зон становится резкой. Ледниковые эпохи Предтеченский относит к переходным состояниям, когда меридиональные вторжения и западно-восточный перенос оказываются более или менее равноценными и когда температура снижается, особенно летом, а осадков выпадает много. Такие условия благоприятствуют накоплению снега и установлению ледниковой эпохи. Множественность ледниковых эпох объясняется совместным влиянием на циркуляционные процессы накладывающихся друг на друга циклов солнечной активности разной продолжительности и амплитуды.

Гипотеза В.М. Синицына. Данная гипотеза является развитием взглядов Г.Ф. Лунсгергаузена и Г.П. Тамзаряна (1950-е гг.) и постулирует связь долгопериодических изменений климата с долгопериодическими изменениями геологических и биологических процессов на Земле. Существуют два типа развития Земли: геократический и талассократический. Геократический тип характеризуется общим всплыванием масс земной коры, широким распространением суши, резко выраженным аридным климатом, общим ослаблением процессов осадконакопления, усилением гранитообразования, кризисом флоры, почти полным прекращением угленакопления и бокситообразования. Талассократический тип выражен в погружении значительных участков коры, наступлении моря, увлажнении климата и плотной облачностью, увеличением объёмов терригенного осадконакопления, развитием вулканических серий и внедрением интрузий, пышным развитием растительности, интенсивным накоплением растительного углерода и углей. Существует и переходный тип, отвечающий смене двух предыдущих. Для него типичны контрастный климат, бурный вулканизм, динамичность физико-географической среды и пестрота ландшафтов, чёткая биогеографическая зональность на суше и в море, усиление и усложнение процессов седиментации, вспышки угленакопления, рифообразования, бокситообразования и галогенеза.

Геолого-географические концепции (модели) могут быть разделены на две подгруппы: гипотезы, объясняющие вариации климата с изменением состава и свойств атмосферы, и гипотезы, объясняющие климатические флуктуации изменениями поверхности Земли.

Гипотеза о роли вулканизма. Следует отметить, что значительное понижение солнечной радиации (на 10–20%) явилось следствием катастрофических извержений вулканов: Кракатау в 1883 г. (выброшено 18 км³ рыхлых вулканических продуктов) и Катмай в 1912 г. (выброшено 21 км³ рыхлых вулканических продуктов). Современные наблюдения показывают, что за крупными извержениями вулканов следовали холодные годы: 1884–1885 гг. (после извержения 1883 г.) и 1913 г. (после извержения 1912 г.). Однако интенсивный вулканизм позднего девона, ранней перми, позднего триаса, поздней юры не ассоциируется с похолоданиями климата. Катмайское извержение произошло через 29 лет после извержения вулкана Кракатау. Такая периодичность не отвечает известным астрономическим циклам. Она больше циклов обращения Земли вокруг Солнца (11 лет), но значительно меньше циклов колебания солнечной активности (400–600 лет). Данное противоречие современных наблюдений и геологической летописи не позволяет уверенно оценить роль вулканизма как фактора климата в планетарном масштабе. Достоверно можно судить лишь о локальном воздействии на климат.

Гипотеза о роли рельефа Земли. Климат во многом зависит от рельефа Земли. Но климат через выветривание формирует рельеф. Такая взаимосвязь климата и рельефа стала основой представления о влиянии рельефа на климат. Во-первых, отношение площади континентов и океанов отражается на общем типе климата и циркуляции атмосферы. При господстве океанов, воды которых медленнее нагреваются и медленнее остывают, климат Земли становится равномернее, циркуляционные процессы — слабее. Господство суши над морем приводит к установлению континентального климата с большим градиентом температуры экватор — полюс и отчётливыми межсезонными контрастами климата. Также усиливается атмосферная циркуляция. Во-вторых, имеет значение географическое расположение основных материковых блоков. Если они сосредоточены в основном в высоких широтах, то климат будет значительно континентальнее, чем в случае их размещения в низких широтах. В-третьих, климатическое значение имеет средний гипсометрический уровень суши. С его увеличением происходит уменьшение атмосферного давления, возрастание испарения и общее понижение температуры. При понижении среднего гипсометрического уровня климат материков становится более тёплым и влажным. В-четвёртых, значительна роль высоких хребтов-климаторазделов, блокирующих атмосфер-

ную циркуляцию. Современным примером могут служить Гималаи, разделяющие муссонную область Индостана и сухую область Тибета. Близкими по смыслу являются соображения о связи оледенений с орогеническими периодами, когда резко возростала площадь, занимаемая сушей при возрастании высоты гор. Однако история геологического развития и современность дают много примеров, опровергающих прямую связь между палеогеографическими, географическими и палеоклиматическими, климатическими изменениями. Оледенения сопровождали только герцинскую и альпийскую фазы горообразования. Для всех остальных орогенических фаз нет свидетельств оледенений. Резкое чередование гляциалов и интергляциалов в четвертичном периоде происходило по сути при неизменном рельефе.

Гипотеза о роли поднятий океанического дна. Формирование подводных гряд приводит к нарушению циркуляции водных масс. Это влечёт за собой изоляцию и понижение температуры полярных бассейнов. Примером предложенной в 1958 г. Рухиным гипотезы может служить связь четвертичного оледенения с поднятием подводной гряды Томпсона (Атлантический океан). Поднявшаяся гряда блокировала Гольфстриму доступ в Северный Полярный бассейн, который стал охлаждаться и покрываться льдом. Холодные массы сухого воздуха, формировавшиеся над этим бассейном, перемещались в сторону экватора и, соприкасаясь с тёплыми воздушными атлантическими массами, способствовали образованию осадков (преимущественно снега). Эти факторы вызывали развитие оледенения в Европе и Северной Америке. При последующем опускании гряды Томпсона тёплые воды Гольфстрима проникали на север, прогревая Северный Полярный бассейн. С прогреванием Северного бассейна происходила деградация снежных и ледовых покровов. Недостатки данной гипотезы следующие. Во-первых, при связи поднятий и опусканий гряды Томпсона с оледенением выхолаживание климата скорее всего было бы локализовано и не проявилось в планетарном масштабе. Во-вторых, поднятия и опускания гряды Томпсона не могли ограничиваться только четвертичным периодом, но воздействие этого механизма на климат дочетвертичного времени не обнаружено.

Гипотеза о роли состава атмосферы. Лучистая энергия Солнца трансформируется атмосферой в тепловую. Современная атмосфера пропускает 48% солнечных лучей, идущих к планете, и задерживает 93% её длинноволнового излучения. Тепловые свойства атмосферы определяются её составом. Состав атмосфе-

ры эволюционировал в геологической истории Земли, а, следовательно, изменялись и свойства атмосферы. Из многокомпонентного состава современной атмосферы наибольшее климатическое значение имеют водяной пар, углекислый газ и озон. Водяной пар обладает свойствами проницаемости для коротковолновой солнечной радиации и экранирования длинноволнового земного излучения. Повышение концентрации водяного пара влечёт за собой усиление «парникового эффекта» и потепление климата. Помимо потепления климата водяной пар, сконденсированный в облаках, повышает отражательную способность Земли, вызывая похолодание. Содержание водяного пара определяется факторами испарения и увлажнения, зависящими от количества солнечной радиации, достигающей поверхности Земли.

С появлением первых фотосинтезирующих организмов 2,2 млрд лет назад атмосфера Земли стала насыщаться кислородом, а содержание углекислого газа стало уменьшаться. Современные растения ежегодно поглощают около 1/35 всего количества CO_2 , содержащегося в атмосфере. В карбонатных осадках палеозоя сконцентрировано количество CO_2 в 15 000 раз больше, чем содержащееся в современной атмосфере. Баланс кислорода и углекислого газа в основном определяется растительным покровом Земли, который в свою очередь зависит от климата. Углекислый газ атмосферы также расходуется при процессах выветривания, торфонакопления и образования карбонатных осадков. Возврат углекислого газа происходит при процессах минерализации животных и растительных остатков, дыхания, разложения горючих полезных ископаемых и выноса из недр земли вулканами и гидротермами. Наличие в стратисфере Земли огромных масс связанного CO_2 , заключённого в горючих полезных ископаемых, указывает на то, что в геологическом прошлом расход CO_2 преобладал над приходом.

Основная масса CO_2 растворена в водах океана, где его количество в 50 раз больше, чем в атмосфере. Концентрация CO_2 в атмосфере определяется также его обменом в системе «атмосфера—гидросфера». Около 200 млрд т газа ежегодно перетекает из воздуха в воду и обратно. Изменение этого баланса и баланса кислород — углекислый газ влияет на климат. Общее понижение концентрации CO_2 вызывает похолодание, а повышение — потепление климата. Озон задерживает длинноволновое излучение Земли и усиливает «тепличный эффект» атмосферы. Озон продуцируется в ионосфере под воздействием ультрафиолетовой ра-

диации. Усиление ультрафиолетовой радиации вызывает уплотнение озонового слоя и потепление климата. Эволюция состава атмосферы в геологической летописи; сложные процессы расхода (в том числе и биогенного) и прихода (в том числе и вулканогенного) CO_2 в атмосферу; продукция озона, обусловленная ультрафиолетовой радиацией; генезис водяного пара, связанный с климатически обусловленными процессами увлажнения и испарения, не позволяют придать атмосфере статус единственного климатообразующего фактора.

В истории планеты можно выделить ряд временных интервалов, отвечающих глобальному похолоданию климата с формированием ледниковых покровов, получивших название *великих оледенений*, или ледниковых эпох (Габдуллин и др., 2005, 2011): позднеархейское (2,8 млрд лет); раннепротерозойское (2 млрд лет); среднерифейское (1,2–1,1 млрд лет), связанное с гренвилльской эпохой орогенеза; позднерифейское (0,9–0,8 млрд лет); позднерифейское (0,8–0,75 млрд лет); варангерское (лапландское), или ранневендское-позднерифейское (610–570 млн лет), которому предшествовал и сопутствовал байкальский орогенез; позднеордовикское-раннесилурское (карадок-венлок), совпадающее с таконской фазой каледонского орогенеза; позднедевонское, с запозданием совпадающее с акадской фазой каледонского орогенеза; позднепалеозойское (гондванское) (ранний карбон-казанский век поздней перми); апшеронское (поздний плиоцен, неоген); четвертичные оледенения: окское, днепровское, московское, ранневалдайское (калининское), поздневалдайское (осташковское).

Литература к главе 2

- Аквис Т.М., Девдариани А.С. Математическая модель осадконакопления на материковых окраинах Атлантического океана // Геология морей и океанов. М.: Ин-т океанологии АН СССР, 1982. Т. 3. С. 10–11.
- Александров С.М. Нелинейность рельефообразующих процессов и экстремальные ситуации. М.: ИГ РАН, 1996.
- Алексеев В.В. Биогеоценозы — автогенераторы и триггеры // Журн. общ. биологии. 1976. Т. 37. № 6. С. 738–744.
- Алешковский И.А., Иванов А.В., Ильин И.В. и др. Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010.
- Ананьев Г.С. Катастрофические процессы рельефообразования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998.
- Арманд А.Д. Нивальные карты и реки как самоорганизующиеся системы // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1980. № 2. С. 3–15.

- Арманд А.Д. Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Наука, 1988а.
- Арманд А.Д. Самоорганизация земной поверхности: географическая синергетика // Математическое моделирование сложных биологических систем: Материалы X Всесоюз. школы. М.: Наука, 1988б. С. 33–49.
- Арманд А.Д. Самоорганизация и геосистемы // Самоорганизация и динамика геоморфосистем: Материалы XXVII Пленума геоморфол. комис. РАН. Томск: Ин-т оптики атмосферы СО РАН, 2003.
- Арманд А.Д., Ведюшкин М.А. Триггерные геосистемы. М.: Ин-т географии АН СССР, 1989.
- Арманд А.Д., Кайданова О.В. Ландшафтные триггеры // Изв. РАН. Сер. геогр. 1999. № 3. С. 22–28.
- Арманд А.Д., Люри Д.И., Жерихин В.В. и др. Анатомия кризисов. М.: Наука, 1999.
- Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990.
- Афанасьев С.Л. Ритмы и циклы в осадочных породах // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1974. № 6. С. 141–142.
- Базай А.В., Иванюк Г.Ю. Фрактальные свойства железорудных толщ // Геология Балтийского щита и других докембрийских областей России. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 1996. С. 44–50.
- Балуховский Н.Ф. Геотемпология — наука о периодичности геологических явлений // Цикличность осадконакопления и закономерности размещения горючих полезных ископаемых. Новосибирск, 1975. С. 9–10.
- Басков В. Волны и пляжи. Л.: Гидрометеиздат, 1966.
- Баталин А.М., Даричева Л.В., Чупрынин В.И. О моделировании автоколебаний в атмосферно-океанических круговоротах // Мор. гидро-физ. исслед. АН УССР. 1974. № 3(66). С. 117–127.
- Безручко Б.П., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Путь в синергетику: Экскурс в десяти лекциях. М.: КомКнига, 2005.
- Белоусов В.В. Земная кора и верхняя мантия океанов. М.: Наука, 1968.
- Белоусов В.В. Основы геотектоники. М.: Наука, 1975.
- Белоусов В.В. Эндогенные режимы материков. М., 1978.
- Беляев В.И. Теория сложных геосистем. Киев: Наукова думка, 1978.
- Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р. Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Вектор Бук, 2003.
- Берг Л.С. Наука, ее содержание, смысл и классификация // Изв. Геогр. ин-та. 1921. № 2.
- Ботвинкина Л.Н., Алексеев В.П. Цикличность осадочных толщ и методика ее изучения. Свердловск: Уральский гос. ун-т, 1991.
- Бутенин Н.В., Неймарк Ю.И., Фуфаев Н.А. Введение в теорию нелинейных колебаний. М.: Наука, 1976.
- Быков В.Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. Владивосток: Дальнаука, 2000.
- Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987.
- Васильев Л.Н. Фрактальность и самоподобие природных пространственных структур // Изв. РАН. Сер. геогр. 1997. Вып. 5. С. 25.
- Вассоевич Н.Б. Уточнение понятий и терминов, связанных с осадочными циклами, стадийностью литогенеза и нефтеобразования // Основные теоретические вопросы цикличности седиментогенеза. М., 1977. С. 34–58.

- Вассоевич Н.Б. Слоистость (осадочных образований): Геологический словарь. М.: Недра, 1978. Т. 2. С. 240—244.
- Вербицкий М.Я., Чаликов Д.В. Моделирование системы ледники-океан-атмосфера. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
- Волков Ю.Н. Термодинамические долгопериодные колебания океана и атмосферы в северной части Тихого океана // Океанология. 1980. Т. 20. № 6. С. 818—827.
- Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. М.: Наука, 1976.
- Вопросы нелинейной геологии и геодинамики. Материалы III семинара по нелинейной геологии и геодинамике. М.: ГЕОС, 1998.
- Вопросы нелинейной геофизики. М.: Недра, 1981.
- Габдуллин Р.Р., Иванов А.В. Ритмичность карбонатных толщ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002.
- Габдуллин Р.Р., Иванов А.В., Кошелев А.В., Копаевич Л.Ф. Тренинг по секвентной стратиграфии: Учеб. пособие для повышения квалификации специалистов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010 [электронное издание].
- Габдуллин Р.Р., Ильин И.В., Иванов А.В. Эволюция Земли и жизни. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005.
- Габдуллин Р.Р., Ильин И.В., Иванов А.В. Введение в палеоглобалистику. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011.
- Габдуллин Р.Р., Копаевич Л.Ф., Иванов А.В. Секвентная стратиграфия. М.: Макс-Пресс, 2008.
- Гангнус А. Технопарк юрского периода. Загадки эволюции. М.: Вече, 2006.
- Геологическая синергетика. Тезисы докладов I всесоюзного совещания. Алма-Ата, 1991.
- Геоперпетуальность. Сборник научных трудов. Новосибирск, 1976.
- Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973.
- Глобальные системы городов / И.И. Абылгазиев, А.В. Иванов, И.В. Ильин, Ю.Н. Саямов, А.С. Шешнев, И.А. Яшков, А.Д. Урсул. М.: МАКС-Пресс, 2012.
- Глобальные социоприродные процессы и системы / И.И. Абылгазиев, Р.Р. Габдуллин, И.В. Ильин, А.В. Иванов, И.А. Яшков. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011.
- Горяинов П.М. Самоорганизация как возможный механизм образования структурных ансамблей железистых кварцитов (на примере Кировогорского месторождения) // Структурные исследования в области раннего докембрия. Л.: Наука, 1989. С. 112—127.
- Горяинов П.М. Нелинейная тектоника: содержание, объекты и принципиальные ограничения для интерпретации канонических случаев. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 1995.
- Горяинов П.М., Егоров Д.Г., Иванюк Г.Ю. О структурно-вещественной самоорганизации в архейских железорудных ансамблях (Кольский полуостров) // Доклады РАН. 1992. Т. 322. № 6. С. 1123—1127.
- Горяинов П.М., Егоров Д.Г., Иванюк Г.Ю. К построению синергетической модели железистых кварцитов докембрия (на материалах по железорудным формациям Кольского полуострова) // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 9. С. 1490—1496.
- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований. М.: Геос, 2001.
- Гусев А.М., Касьянов С.Ю. О структуре фазового пространства в модели трехмерной конвекции во вращающейся жидкости // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика, астрономия. 1984. № 2. С. 81—84.

- Дарвин Ч. Автобиография / Чарльз Дарвин. Происхождение видов. М.: Гос. изд-во сельскохозяйственной литературы, 1952. С. 33—74.
- Даричева Л.В., Дуванин А.И., Чупрынин В.И. Моделирование автоколебательной системы океан-атмосфера // Океанология. 1972. № 5. С. 892—897.
- Даричева Л.В., Чупрынин В.И. Простая математическая модель для описания крупномасштабных процессов в океане и атмосфере // Исследование системы «ледники-океан-атмосфера». Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 55—65.
- Даричева Л.В., Чупрынин В.И. Эксперименты по моделированию автоколебаний, обусловленных взаимодействием океана и атмосферы // Океанология. 1983. Т. 23. № 3. С. 399—405.
- Девдариани А.С., Питовранов С.Е. Некоторые закономерности эволюции материковых окраин атлантического типа (по результатам математического моделирования) // Океанология. 1981. Т. 21. № 2. С. 323—328.
- Джансеитов К.К., Кузьмичев В.В., Кибарддин Ю.В. Конкуренция и периодичность процесса прироста леса // Доклады АН СССР. 1976. Т. 226. № 3. С. 695—697.
- Дийкстра Х.А. Нелинейная физическая океанография. Применение теории динамических систем к крупномасштабной циркуляции океана и Эль-Ниньо. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2007.
- Дискретные свойства геофизической среды / Под общ. ред. М.А. Садовского. М.: Наука, 1989.
- Дуванин А.И. О модели взаимодействия между макропроцессами в океане и атмосфере // Океанология. 1968. Т. 8. № 4. С. 571—570.
- Дуванин А.И. О взаимодействии между гидрометеорологическими макропроцессами в океане и атмосфере // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1977. № 5. С. 89—95.
- Егоров Е.Н., Иванов А.В., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е., Яшков И.А. Синергетика и геоэкология: опыт коэволюции // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18. № 2. С. 145—149.
- Жевакин С.А. Теория звездных пульсаций // Пульсирующие звезды. М., 1970. С. 17—63.
- Жемчужников Н.Г. Автоколебательный характер океанического рифтогенеза // Докл. РАН. 1993. Т. 332. № 4. С. 500—501.
- Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. М.: Наука, 1984.
- Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988.
- Зейдис И.М., Кружалин В.И., Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю., Циммерман К. Общие свойства динамики геосистем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2001. № 4. С. 3—8.
- Зимов С.А. Азбука рисунков природы. М.: Наука, 1993.
- Зимов В.А., Чупрынин В.И. Устойчивые состояния экосистем Северо-Востока Азии // Доклады АН СССР. 1989. Т. 308. № 6. С. 1510—1514.
- Зимов С.А., Чупрынин В.И. Экосистемы: устойчивость, конкуренция, целенаправленное преобразование. М.: Наука, 1991.
- Иванов А.В. Коэволюция геосфер: элементы биниальности и синергетики // Биниология, симметрология и синергетика в естественных науках. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2004. С. 8—12.
- Иванов А.В. Некоторые размышления о восприятии эволюционных и синергетических идей // Недра Поволжья и Прикаспия. 2007. Вып. 52. С. 63—83.

- Иванов А.В.* Фрактально-ячеистая модель геосфер // Геология: история, теория, практика. Матер. межд. конф., посвященной 250-летию Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН. М.: ГГМ РАН, 2009. С. 94–96.
- Иванов А.В., Короновский А.А., Минюхин И.М., Яшков И.А.* Определение фрактальной размерности овражно-балочной сети города Саратова // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика, 2006. Т. 14. № 2. С. 64–74.
- Иванюк Г.Ю.* Фрактальные геологические среды: размерность, основные типы, генетические следствия // Физика Земли. 1997. № 3. С. 21–31.
- Иванюк Г.Ю., Горяинов П.М., Егоров Д.Г.* Введение в нелинейную геологию. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996.
- Известия РАН. Сер. геогр. 1993. № 5.
- Исаченко А.Г.* Общая и региональная физическая география // Развитие физико-географических наук (XVII–XX вв.). М.: Наука, 1975. С. 308–417.
- Казан Б.А., Маслова Н.Б., Сент В.В.* Разрывные автоколебания термохалинной циркуляции океана // Докл. АН СССР. 1991. Т. 319. № 4. С. 979–984.
- Кадомицев Б.Б., Карпман В.И.* Нелинейные волны // Успехи физ. наук. 1971. Т. 103. С. 193–232.
- Кадомицев Б.Б., Рыдник В.И.* Волны вокруг нас. М.: Знание, 1981.
- Казанцева Т.Т.* О линейности и нелинейности в геодинамике в связи с геологическими законами эволюции // Изв. Отделения наук о Земле Академии наук Башкортостана. Уфа, 2002. № 8. С. 115–123.
- Катица С.П., Курдюмов Б.Б., Малинецкий Г.Г.* Синергетика и прогнозы будущего. М.: Наука, 1997.
- Карогодин Ю.Н.* Ритмичность осадконакопления и нефтегазоносность. М.: Недра, 1974.
- Карогодин Ю.Н.* Седиментационная цикличность. М.: Недра, 1980.
- Карпинский А.П.* Собр. соч. М.; Л., 1945–1949. Т. I–IV.
- Касьянов С.Ю.* Стационарные и колебательные режимы конвекции во вращающейся жидкости // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 3. С. 320–323.
- Кейлис-Борок В.И.* Динамика литосферы и прогноз землетрясений // Природа. 1989. № 12. С. 10–18.
- Князева Е.Н.* Одиссея научного разума. Синергетическое видение научного прогресса. М.: Наука, 1995.
- Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика. Начала нелинейного мышления // Обществ. науки и современность. 1993. № 2. С. 38–61.
- Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Основания синергетики. Синергетическое мировидение. М.: КомКнига, 2005.
- Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика. Нелинейность времени и ландшафты коэволюции. М.: КомКнига, 2007.
- Коваленко В.В.* Нелинейные аспекты частично инфинитного моделирования в эволюционной гидрометеоэкологии. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2002.
- Котляков В.М., Лебедева И.М.* «Кающиеся» снега и льды, механизм их образования и индикационное значение // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1975. № 3. С. 26–36.
- Коэволюция геосфер: от ядра до Космоса. Материалы Всероссийской научной конференции памяти чл.-корр. РАН Г.И. Худякова. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2012.
- Крацов Ю.А., Эткин В.С.* Ветровое волнение как автоколебательный процесс // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 11. С. 1123–1138.

- Кузнецов О.Л.* Преобразование и взаимодействие геофизических полей в литосфере и эволюция геологических процессов // Эволюция геологических процессов в истории Земли. М., 1993. С. 63–81.
- Кэри У.* В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. История догм в науках о Земле. М.: Мир, 1991.
- Летников Ф.А.* Синергетика геологических систем. М.: Наука, 1990.
- Летников Ф.А.* Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1992.
- Летников Ф.А.* К проблеме синергетики геологических систем // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 1. С. 34–56.
- Летников Ф.А.* Синергетика среды обитания человека // Земля и Вселенная. 1998. № 5. С. 17–25.
- Летников Ф.А.* Синергетика среды обитания человека // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. М.: Янус–К, 2002. С. 69–78.
- Лобковский Л.И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988.
- Лобковский Л.И.* Всеразрушающая волна // В мире науки. 2005. № 5. С. 75–81.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004.
- Лукьянов А.В.* Собственные колебания в моделях геологических автоколебательных систем // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука, 1985. С. 94–112.
- Лукьянов А.В.* Релаксационные автоколебательные системы в геологических процессах // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР, 1987. С. 8–86.
- Лукьянов А.В., Зинько В.В., Щерба И.Г.* Автоколебательная природа ритмичности осадконакопления // Геология морей и океанов. М.: Ин-т океанологии АН СССР, 1982. Т. 3. С. 33–35.
- Лукьянов А.В., Зинько В.В., Щерба И.Г.* Образование ритмично построенных толщ в результате возникновения автоколебательной системы в бассейне седиментации // Математические методы анализа цикличности в геологии. М.: Наука, 1984. С. 99–107.
- Мазо В.Л.* Ледники и ледниковые системы: неустойчивость и самоорганизация. М., 1989.
- Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. М.: ИКИ, 2002.
- Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л., 1939.
- Милановский Е.Е.* Пульсации Земли // Геотектоника. 1995. № 5. С. 3–24.
- Моисеев Н.Н.* Судьба цивилизации: Путь Разума. М.: Языки рус. культуры, 2000.
- Монин А.С.* Теоретические основы геофизической гидродинамики. Л.: Гидрометеониздат, 1988.
- Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Наука, 1965.
- Найденев В.И.* Почему меняется уровень Каспия // Природа. 1992а. № 1. С. 68–74.
- Найденев В.И.* Нелинейная модель колебаний уровня Каспийского моря // Мат. моделирование. 1992б. Т. 4. № 6. С. 50–64.
- Найденев В.И.* Нелинейная динамика поверхностных вод суши. М.: Наука, 2004.
- Найденев В.И., Кожевникова И.А.* Нелинейные колебания уровня Каспийского моря и глобального климата // Доклады РАН. 2001. Т. 378. № 1. С. 51–57.

- Найденев В.И., Кожевникова И.А. Хаотическая динамика гидросферы и климата // Доклады РАН. 2002. Т. 384. № 3. С. 385–390.
- Наливкин Д.В. Этапы развития органического мира: проблемы этапности развития органического мира // Труды 18-й сессии Всесоюзного палеонтологического общества. Л.: Наука, 1978. С. 11–16.
- Нелинейные феномены, хаос, критические явления и методы их исследования с помощью вейвлетного, кластерного и спектрального анализа в геоэкологических процессах. Материалы Всероссийской научной школы для молодежи. Саратов: СГУ; «Новый ветер», 2009.
- Никишин А.М., Якубчук А.С. Модель глобальной тектоники: взаимодействие плит и плюмов // Бюллетень Московского об-ва испытателей природы. Отд. Геол. 2002. Т. 77. Вып. 2. С. 3–17.
- Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979.
- Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990.
- Нургадзе Н.Г., Утемов Э.В., Косарев В.Е. Фрактальные образы диаграмм гамма-каротажа в корреляции верхнепермских отложений природных резервуаров тяжелых нефтей Западного Закарья // Геология нефти и газа. 2007. № 5.
- Паулл К.С. Вглядываясь вглубь // В мире науки. 1981. № 8. С. 79–88.
- Пелиновский Е.Н. Волны цунами // Нелинейные волны. Распространение и взаимодействие. М.: Наука, 1981. С. 187–203.
- Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн-цунами. Горький, 1982.
- Пелиновский Е.Н. Нелинейная теория набегающих морских волн на берег // Нелинейные волны. Динамика и эволюция. М.: Наука, 1989. С. 351–358.
- Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1996.
- Перельман А.И. Геохимический ландшафт как самоорганизующаяся система // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1995. № 4. С. 10–16.
- Подобина В.М., Родыгин С.А. Историческая геология. Томск: Изд-во НТЛ, 2000.
- Поздняков А.В. К теории спонтанной самоорганизации сложных структур // Самоорганизация и динамика геоморфосистем. Материалы XXVII Пленума геоморфологической комиссии РАН. Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 2003. С. 30–43.
- Поздняков А.В., Черванев И.Г. Самоорганизация в развитии рельефа. М.: Наука, 1990.
- Проблемы нелинейной сейсмологии. М.: Наука, 1987.
- Проблемы синергетики и коэволюции геосфер. Материалы Всероссийского научного симпозиума / ред. Г.И. Худяков, Д.И. Трубецков, А.В. Иванов и др. Саратов: Изд-во Саратовского ин-та РГТЭУ, 2008.
- Пузаченко Ю.Г. Приложение теории фракталов к изучению структуры ландшафта // Изв. РАН. Сер. геогр. 1997. Вып. 2. С. 24.
- Пушаровский Ю.М. Нелинейная геодинамика (кредо автора) // Геотектоника. 1993. № 1. С. 3–6.
- Пушаровский Ю.М. Нелинейная геодинамика. М.: Наука, 1994а.
- Пушаровский Ю.М. Тектоника Атлантики с элементами нелинейной геодинамики. М.: Наука, 1994б.
- Пушаровский Ю.М. Парадигмы в геологии // Природа. 1995. № 1. С. 33–42.
- Пушаровский Ю.М., Соколов С.Д. Нелинейная тектоника // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. С. 476–508.
- Рыскин М.И., Иванов А.В. Нелинейная динамика в науках о Земле: информация к размышлению // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2003. № 6. С. 138–148.

- Садовский М.А. Новая модель геофизической среды // Българско геофизично списание, 1985. Т. XII. № 2. С. 3–10.
- Садовский М.А. Избр. труды. Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Дискретные иерархические модели геофизической среды // Комплексное исследование по физике Земли: ИФЗ-60 лет. М.: Наука, 1989. С. 9–26.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991.
- Самоорганизация и динамика геоморфосистем. Материалы XXVII Пленума геоморфологической комиссии РАН. Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 2003.
- Свирижев Ю.М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. М.: Наука, 1987.
- Свирижев Ю.М., Логфет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978.
- Сеидов Д.Г. Синергетика океанских процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1989а.
- Сеидов Д.Г. Синергетика геофизических систем // Природа. 1989б. № 9. С. 25–34.
- Сергин В.Я., Сергин С.Я. Системный анализ проблемы больших колебаний климата и оледенения Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1978.
- Синицын В.М. Введение в палеоклиматологию. М.: Недра, 1980.
- Современные глобальные изменения природной среды / Ред. Н.С. Касимов, Р.К. Клинге. Т. 1. М.: Научный мир, 2006.
- Соколов Б.А. Автоколебательная модель нефтеобразования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология. 1990. № 5. С. 3–16.
- Соколов С.Д. Бифуркация в геологии // Вопр. нелинейной геологии и геодинамики. М.: ГЕОС, 1998. С. 28–36.
- Сорохтин О.Г. Эволюция и прогноз изменений глобального климата Земли. М.: Институт компьютерных исследований, 2006.
- Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978.
- Спокойнов А.Н. О механизме возникновения автоколебаний биомассы кедрового // Нелинейные колебания и экология. Ярославль, 1984. С. 83–87.
- Степанов Д.Л., Месежников М.С. Общая стратиграфия (принципы и методы стратиграфических исследований). Л.: Недра, 1979.
- Степанов И.Н. Формы в мире почв. М.: Наука, 1986.
- Сунгатуллин Р.Х. Моделирование природных и техногенных систем промышленно-урбанизированных регионов (на примере Республики Татарстан): Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2010.
- Суханов В.В. Об автоколебаниях и волнах в структуре древостоев темнохвойных лесов // Математическая физика и математическое моделирование в экологии. Владивосток, 1990. Ч. 2. С. 47–64.
- Татевян С.К. Земля меняет свою форму // Земля и Вселенная. 2004. № 3. С. 34–40.
- Теория диссипативных структур в геологическом анализе. Материалы IV конференции по геологической синергетике. Апатиты: Геологический институт КНЦ РАН, 1998.
- Тихомиров В.В. Фиксизм // Большая Советская Энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова. 3-е изд. М.: Советская Энциклопедия, 1977. Т. 27. С. 384.
- Тихонов А.Н., Любимова Е.А., Власов В.К. Об эволюции зон плавления в термической истории Земли // Доклады АН СССР. 1969. Т. 188. № 2. С. 27–31.

- Тихонов А.Н., Любимова Е.А., Власов В.К. Радиоактивная энергия и процессы плавления в недрах Земли // Энергетика геологических и геофизических процессов. М.: Наука, 1972. С. 27–37.
- Томпсон Дж. М.Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. М.: Мир, 1985.
- Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. Экологическая геология. М.: Геоинформмарк, 2002.
- Трофимук А.А., Карогодин Ю.П. Теоретические и прикладные вопросы цикличности седиментогенеза // Основные теоретические вопросы цикличности седиментогенеза. М., 1977. № 3. С. 3–15.
- Трубецков Д.И. Введение в синергетику. Колебания и волны. М.: Едиториал УРСС, 2003.
- Урсул А.Д., Урсул Т.А., Иванов А.В., Маликов А.Н. Экология, безопасность, устойчивое развитие. М.: Университетская книга, 2012.
- Фадеев В.Е. Нелинейные явления и их роль в геотектонике // Геотектоника. 1993. № 1. С. 7–12.
- Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991.
- Федорович Б.А. Динамика и закономерности рельефообразования пустынь. М.: Наука, 1983.
- Физические основы теории климата и его моделирования. Л.: Гидрометеиздат, 1977.
- Фрейдлин М.И., Светлосанов В.А. О влиянии малых случайных возмущений на устойчивость состояний экологических систем // Журн. общ. биологии. 1976. Т. 37. № 5. С. 715–737.
- Фролов В.Т. Литология. Кн. 3. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995.
- Хаин В.Е. От тектоники плит к глобальной геодинамике // Природа. 1995. № 1. С. 42–51.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Научный мир, 2009.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980.
- Хакен Г. Явления перехода и переходные процессы в нелинейных системах // Синергетика. М.: Мир, 1984. С. 7–17.
- Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985.
- Хартия Земли. М., 1997.
- Чупрынин В.И. Самовозбуждающиеся колебания при тепловом и вращательном воздействии на слой воды в цилиндрическом бассейне // Доклады АН СССР. 1976. Т. 229. № 1. С. 63–66.
- Чупрынин В.И. О возмущении температуры жидкости в нестационарном поле скорости // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16. № 8. С. 816–822.
- Чупрынин В.И. Разрывные автоколебания в геофизических системах. М.: Наука, 1985.
- Чупрынин В.И. Конвективные полячеистые структуры Земли. Владивосток, 1997.
- Чупрынин В.И. Пространственно-периодические структуры сортировки частиц твердого материала // Закономерности строения и эволюции геосфер. Материалы Четвертого международного междисциплинарного научного симпозиума. Хабаровск, 1998. С. 54–57.
- Чупрынин В.И. Нелинейности в геосистемах // Изв. РАН. Сер. геогр. 2003. № 6. С. 7–14.

- Чупрынин В.И.* Моделирование и нелинейная динамика геосистем: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Владивосток, 2004.
- Чупрынин В.И.* Нелинейные явления в геосистемах. М.: Наука, 2008.
- Чупрынин В.И., Даричева Д.В.* Об автоколебаниях в гидродинамических средах при распространении волн по замкнутым траекториям // Труды ДВНИГМИ. 1978. Вып. 70. С. 23–32.
- Шакина Н.П.* Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1990.
- Шафрановский И.И.* Симметрия в природе. Л.: Недра, 1985.
- Шолто В.Н.* Структура Земли: упорядоченность или беспорядок? М.: Наука, 1986.
- Шулейкин В.В.* Физика моря. М.: Наука, 1968.
- Шупер В.А.* Самоорганизация городского расселения. М.: Рос. открытый ун-т, 1985.
- Шупер В.А.* Влияние синергетики на географическое мировоззрение // Изв. РАН. Сер. геогр. 2001. № 4. С. 23–30.
- Щеглов А.Д., Говоров И.Н.* Нелинейная металлогения. М.: Наука, 1985.
- Шукин И.С.* Общая геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. Т. 1, 2.
- Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979.
- Экосистемы в критических состояниях. М.: Наука, 1989.
- Яковенчук В.Н., Иванов Г.Ю., Пахомовский Я.А.* Фрактальный доннейит-маккельвинтовый агрегат как природный аналог «салфетки Серпинского» // Доклады РАН. 1996. Т. 346. № 3. С. 375–379.
- Яшков И.А., Иванов А.В.* Некоторые аспекты реконструирования и нелинейного моделирования эрозивной сети в геологическом прошлом: комментарии географа и геолога к статье В.В. Сидоренко, В.Н. Суртаева, М.М. Хасанова «Новый подход в моделировании строения природных нефтяных резервуаров речного генезиса» // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15. № 3. С. 87–94.
- Albarede F., Hilst R.D. van der.* New mantle convection model may reconcile conflicting evidence // EOS. 1999. Vol. 80. N 45. P. 535–539.
- Barbera L.P., Rosso R.* On the fractal dimension of stream networks // Water Resour. Res. 1989. Vol. 25. N 4. P. 735.
- Claps P., Oliveto G.* Reexamining the determination of the fractal dimension of river networks // Water Resour. Res. 1996. Vol. 32. N 10. P. 3132.
- Fractal and dynamic system in geosciences (Ed. J.H. Kruhl). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994.
- Goldfein M.D., Ivanov A.V., Kozhevnikov N.V.* Fundamentals of General Ecology Life Safety and Environment Protection. New York: Nova Science Publishers. 2011.
- Gore A.* Earth in the Balance: Forging a New Common Purpose. Earthscan. 1992.
- International Symposium on Fractals and Dynamic System in Geosciences. Book of Abstracts. Frankfurt am Main, Germany, 1993.
- Korvin G.* Fractal model in the Earth science. Elsevier Science, 1995.
- Lopes C. de O., Paula G.A. de, Vieira A.C.* Fractallidade da estrutura de drenagen do municipio Rio de Janeiro // Revista Universidade Rural, Serie Clenclas Exalas e da Terra. 2002. Vol. 21. N 2. P. 23.
- Lovelock J.E.* Gaia as seen through the atmosphere // Atmospheric invironment. 1972. N 6. P. 579–659.
- Maryama S., Kumazava S., Kawakami S.* Towards a new paradigm of the Earth's dynamics // J. Geol. Soc. Japan. 1994. 100. N 1. P. 1–3.

- Mazo V.L.* Waves on glacier beds // *J. Glaciol.* 1989. Vol. 35. N 120. P. 179–182.
- McNamara J.P., Kane D.L. Larry D., Hinzman L.D.* An analysis of an arctic channel networks using a digital elevations model // *Geomorphology.* 1999. Vol. 29. P. 339.
- Nagahama H.* Fracturing in the solid Earth // *Sci. Reps. Tohoku Univ., 2nd ser (Geol).* 1997. Vol. 61. P. 103–126.
- Peixoto J.P., Oort A.N.* Physics of Climate. AIP Press, New York, 1992.
- Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A.* Fractal River Basins: Chance and Self-Organization. Cambridge University Press, 1997.
- Sbigneu V.* Cyclostratigraphy as a compromise between Milankovitch and Markov logic // Abstracts of 18-th IAS Regional European Meeting of Sedimentology. Heidelberg, 1997. P. 313.
- Schmitz W.J.* On the mterbasin scale thermohaline circulation // *Rev. Geophys.* 1995. N 33. P. 151–173.
- Schwarzacher W.* Cyclostratigraphy and the Milancovitsh Theory. Elsevier, Amsterdam, 1993.
- Su W., Woodward R.L., Dziekonski A.M.* Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle // *J. Geophys Res.* 1994. Vol. 99. P. 6945–6980.
- Trenberth K.E., Olson J.G., Large W.G.* A global ocean wind stress climatology based on ECMWF analyses Technical report. National Center for Atmospheric Research Boulder CO. U.S.A., 1989.
- Turcotte D.L.* Fractal and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press, 1992.
- Turcotte D.L., Schubert G.* Geodynamic application of continuum physics to geological problems. Jonh Wiley and Sons. New York, 1982.
- Wegener A.* Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Braunschweig: Vieweg, 1915.
- Weller J.M.* Cyclical sedimentation in the Pennsylvanian period and its significance // *J. Geol.* 1930. Vol. 38. N 2. P. 97–135.
- Zabusky N.J., Kruskal M.D.* Interaction of «solitons» in a collisionless plasma and the recurrence of initial states // *Physical Review Letters.* 15. 1965. N 6. P. 240–243.



ЭВОЛЮЦИЯ ЖИЗНИ НА ПРИМЕРЕ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗНООБРАЗИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ВИДОВ КАК ЯРКИЙ ПРИМЕР ГЛОБАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

3.1. Разнообразие биосферы и эволюции биологических видов

Возникновение и развитие живых организмов является одним из самых интригующих и интереснейших глобальных процессов, протекающих на Земле с момента возникновения жизни и до настоящего времени. Почему одни биологические виды вымерли, а другие существуют сегодня, почему среди вымерших видов одни существовали длительное время, а другие — очень короткое (по сравнению с масштабами эволюции), существуют ли какие-либо закономерности в темпах вымирания и эволюции биологических сообществ, возможна ли эволюция в других средах — рассмотрению этих вопросов с точки зрения нелинейной динамики и посвящена эта глава, опирающаяся во многом на книгу (Newman et al., 2003).

Предположительно от 1 до 4 миллиардов биологических видов существовали на Земле с момента первого зарождения жизни, менее чем 50 млн существуют на сегодняшний день (May, 1990), остальные же вымерли. Вполне очевиден вопрос, что же послужило причиной такого значительного вымирания, и многие ученые увлечены исследованием данной проблемы. Немало работ посвящено исследованию вымирания отдельных биологических видов или же изучению известных случаев массового вымирания, например таких как в конце мелового периода. В последнее время, однако, появились работы, в которых вместо исследования статистических особенностей исторического процесса вымирания биологических видов рассматриваются различные математические модели и сравниваются их результаты с известными данными.

Следует отметить, что исчезновение таксонов с лица Земли, как и появление новых, является закономерным следствием эволюции органического мира, неотъемлемой чертой развития биосферы. Как правило, одни таксоны дают начало другим (оставляя потомков), а сами рано или поздно вымирают. Однако нередко

полностью исчезают, не оставив потомков и прямых дочерних ветвей, не только роды и семейства, но отряды и даже классы, представители которых ранее были широко распространены и хорошо приспособлены к среде обитания. Именно такие случаи представляют особый интерес, и обычно они имеются в виду, когда говорят о проблеме вымирания. В настоящее время вымирание рассматривается как глобальный процесс, идущий с более или менее постоянной скоростью (фоновое вымирание), который, однако, нарушается сравнительно кратковременными экстраординарными событиями, характеризующимися крайне интенсивным вымиранием («массовое вымирание») (Алексеев, 1998). Следует отметить, что на сегодняшний момент имеются два принципиально различных определения того, что называть массовым вымиранием. Одно из них используется при статистическом анализе и является чисто формальным. Согласно этому определению под массовым вымиранием понимается любой пик уровня или скорости вымирания, отделенный минимумом от соседнего пика. Согласно другому определению под массовым вымиранием понимается «относительно кратковременное и в масштабе геологического времени синхронное ступенчатое вымирание в ходе биотического кризиса большого числа таксонов организмов, принадлежащих различным систематическим и экологическим группам, что приводит к временному глобальному снижению таксономического разнообразия биосферы» (Алексеев, 1998). Поэтому события, упоминающиеся как «массовые вымирания», иногда подразделяют на три группы:

1) события вымирания (отмечаются в истории развития отдельных групп, но не влияют на изменения глобального разнообразия всей биоты или снижают его незначительно);

2) массовые вымирания-фантомы (события, которые на основе количественного анализа рассматриваются как массовые вымирания, но на деле не могут быть отнесены к таковым);

3) настоящие массовые вымирания (Алексеев, 1995).

В настоящее время существует два основных взгляда на причины вымирания биологических видов. Традиционная точка зрения, разделяемая большинством палеонтологов, а также и другими исследователями, заключается в том, что вымирание является следствием внешнего воздействия на экосистему со стороны окружающей среды (Benton, 1995; Hoffman et al., 1991). Существуют серьезные аргументы в поддержку данной точки зрения — известны случаи особых внешних факторов, приведших к массовому вы-

миранию биологических видов, такие, например, как изменение уровня моря (Hallam, 1989) или столкновение Земли с крупным космическим телом в конце мелового периода (Alvarez, 1987). Понятно, что подобные объяснения не универсальны, но почти все альтернативные гипотезы по своей сути также объясняют случаи массового вымирания внешними воздействиями, хотя диапазон внешних причин, которые могли, по мнению различных исследователей, привести к массовому вымиранию, достаточно широк: от изменения климата (Stanley, 1984) и содержания кислорода в океане (Wilde et al., 1984) до достаточно экзотических, таких как вулканизм (Courtillot et al., 1988), приливно-отливные волны (Bourgeois et al., 1988), изменение магнитного поля Земли (Loper et al., 1988) и даже вспышка сверхновой звезды (Ellis et al., 1995). Рассмотрим коротко некоторые из подобных гипотез, следуя (Алексеев, 1998).

- Галактическая гипотеза. По этой гипотезе массовые вымирания связаны с обращением Солнечной системы вокруг центра Галактики. Изменения потока космических лучей, интенсивности магнитного и гравитационного полей, встреча с пылевыми облаками могли оказывать при этом воздействия на органический мир.
- Колебания солнечной активности, по мнению ряда исследователей, должны были сопровождаться изменениями уровня космических излучений и напряженности магнитного поля, эффективности озонового экрана, потока ультрафиолета, что вызывало климатические флуктуации, приводившие в свою очередь к вымиранию организмов.
- Импактная гипотеза заключается в том, что происходит столкновение Земли с крупным космическим телом — астероидом или кометой. В качестве непосредственных причин в рамках этого сценария принимаются резкие изменения климата: длительная непрозрачность атмосферы для солнечных лучей из-за высокого содержания в ней мельчайших частиц, возникших вследствие удара, глобальное понижение температуры из-за уменьшения интенсивности солнечного потока, штормовые пожары, кислотные дожди как результат образования колоссальных количеств окислов азота во время взрыва астероида и т.д.
- Взрыв сверхновой звезды. В соответствии с этой гипотезой в окрестностях Земли имел место взрыв сверхновой звезды и в связи с этим произошло резкое усиление потока космических лучей, прежде всего их нейтронной составляющей, что вело к гибели организмов в результате роста числа мутаций.

- Гипотеза вулканизма. Выделение в ходе вулканизма громадных количеств углекислого газа, окислов азота и серы приводит к резким изменениям климата и глобальному вымиранию организмов.
- Колебания уровня моря могло приводить к регрессии мелководных морей и шельфов и исчезновению в связи с этим свойственной им разнообразной донной биоты.
- Изменение состава атмосферы. В рамках этой гипотезы полагается, что резкие колебания концентрации кислорода в атмосфере могли вызвать селективное вымирание чувствительных групп животных.

Существует еще целый ряд гипотез, на которых мы не останавливаемся. Отметим, однако, случаи массового вымирания биологических видов составляют примерно 35% от общего числа вымерших видов, и для оставшихся 65% нельзя указать какое-либо значительное внешнее воздействие, явившееся причиной вымирания того или иного вида. Тем не менее, многие полагают, что именно внешним воздействием окружающего мира на экосистему можно объяснить все случаи вымирания биологических видов.

В то же самое время увеличивается число ученых, считающих, что глобальный процесс вымирания биологических видов обусловлен биологическими причинами, что он является естественной и неотъемлемой частью динамики экосистем и происходит независимо от внешних воздействий со стороны окружающей среды. Для выяснения причин вымирания биологических видов предлагаются модели, основанные на межвидовом взаимодействии, такие как введение нового конкурента в ранее стабильную биологическую систему или чрезмерно активные действия хищников (см., например, Smith, 1989). Однако проблема заключается в том, что подобные случаи вымирания, если они действительно имели место, затрагивают очень незначительное число видов, а следовательно, эти случаи практически неразличимы на общем фоне, и соответственно трудно сказать с уверенностью, действительно ли вышеназванные факторы играли существенную роль в глобальном процессе эволюции.

В последнее время рассматриваются такие аспекты, как относительная частота крупных или мелких случаев вымирания биологических видов. Полученные результаты сравниваются с известными данными, и на основании этого делается заключение о пригодности (или, наоборот, ошибочности) данной модели. Некоторые модели основываются на биологических причинах выми-

рания тех или иных видов; другие, наоборот, в своей основе имеют предположения о том, что внешние факторы являются причиной вымирания видов; наконец, существует группа моделей, в которых учитываются как биологические, так и внешние факторы. Поскольку исследования в этой области начались относительно недавно, то, вполне естественно, что еще нет устоявшихся положений, и целый ряд моделей, основывающихся на различных механизмах гибели биологических видов, демонстрируют хорошее соответствие с реальными данными. Однако имеет место целый ряд особенностей, которые существенно усложняют сопоставление результатов, полученных с помощью моделей, с реальными палеонтологическими данными. Их необходимо принимать во внимание и делать соответствующие поправки.

3.2. Исторический экскурс в проблему эволюции видов

Основным источником данных является так называемая палеонтологическая летопись, под которой понимают совокупность материальных документов об органическом мире прошлого, сохранившихся в осадочной оболочке Земли. Осадочная оболочка, сложенная последовательными напластованиями осадочных горных пород, является довольно хорошим регистрирующим инструментом, записывающим с той или иной степенью точности все события, происходящие в биосфере. Современные методы стратификации и геохронологии позволяют более или менее точно датировать записанные в осадках данные, что обеспечивает возможность их последующего анализа. Понятно, что подобный «записывающий механизм» несовершенен. Утрата информации начинается сразу после отмирания или гибели организмов, и лишь небольшая их часть, прежде всего имеющие минеральные скелеты, попадает в осадки. В осадках на стадии их превращения в породы происходит дальнейшая потеря информации, которая продолжается и позднее, когда породы разрушаются эрозией, погружаются на большие глубины и т.п. В результате от первоначального объема информации о древней биоте могут сохраняться лишь малые доли процента. Еще одно ограничение связано с тем, что современная наука способна извлечь и «расшифровать» только часть сохранившейся в палеонтологической летописи информации, хотя эти возможности непрерывно расширяются.

Палеонтологическая летопись может быть разделена на отдельные составляющие: потенциальную — останки, которые находят-

ся в горных породах и которые могут быть когда-либо изучены; неопубликованную — часть собранных коллекций и материалов, которая либо находится в обработке, либо никогда не обрабатывалась, либо обработанная, но не опубликованная по различным причинам (смерть исследователя, недостаточность финансирования, утрата в ходе войн); опубликованную — информация, обнародованная через печатные издания и ставшая известной научному сообществу. Неполнота опубликованных данных очевидна, но именно эта составляющая палеонтологической летописи является источником всех доступных для науки сведений о биоте прошлого.

Однако и опубликованная палеонтологическая летопись не является единой: на данный момент существуют две, в значительной степени независимые части палеонтологической летописи. Одна из них, зафиксированная в морских породах, послужила основой для разработки хроностратиграфической шкалы и дает наиболее полную и надежную информацию об исторических изменениях биоты, но только ее морской компоненты. Останки пресноводных и наземных организмов в морские породы попадают нечасто, и их доля вряд ли превышает 1%. Вторая часть сохранилась в континентальных породах и намного менее представительна, чем морская. Регистрирующая способность морских осадков в целом значительно выше, чем континентальных. Соответственно палеонтологическая летопись континентальных организмов плохо коррелирует с морской. Объединение этих двух частей в единую летопись в ряде случаев оказывается не только трудным, но и нецелесообразным. Таким образом, эти две части летописи могут рассматриваться как относительно независимые, что должно учитываться при анализе опубликованных данных.

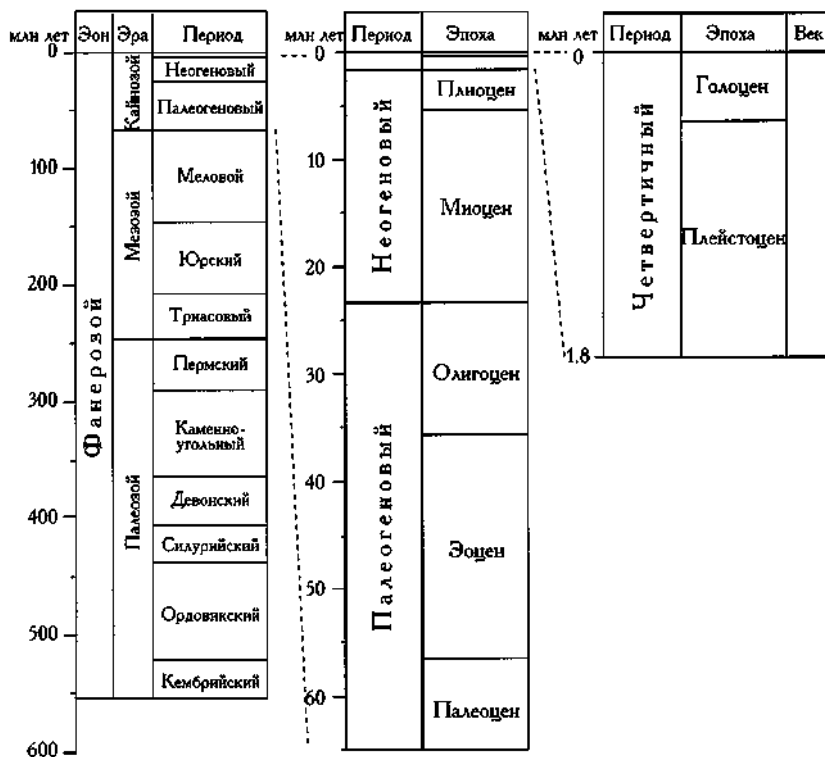
Отметим, что полной информации о числе описанных таксонов ископаемых организмов не существует. В настоящее время наиболее широко используются две базы данных: база данных, составленная Сепкоским (Sepkoski, 1993), и база данных Бентона (Benton, 1993). База данных Сепковского содержит в себе информацию как по биологическим родам (примерно 40 тыс.), так и по семействам (примерно 5 тыс.); подавляющее большинство данных относятся к морским беспозвоночным. База данных Бентона, напротив, включает в себя информацию как по морской, так и по наземной фауне и содержит данные о 7 тыс. биологических семейств. По некоторым оценкам, на сегодняшний день общее число описанных в научной литературе родов животных и ис-

копаемых растений составляет 50—70 тыс. единиц, а ископаемых видов — 350 тыс. (Алексеев, 1998). Однако эти цифры относятся не к реальным таксонам, а лишь к их названиям. В реальности эти цифры, по оценкам специалистов, меньше на 20—30% из-за того, что одни и те же таксоны фигурируют в научной литературе под разными названиями и споры в систематике продолжаются. Если попытаться сделать оценку того, какую часть представляют собой описанные таксоны от общего числа существовавших на Земле, то можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день наука располагает сведениями о 5—20% вымерших родов, около 50% вымерших семейств и 20—30% видов. Этого числа таксонов оказывается достаточно, чтобы выявить основные закономерности изменения разнообразия биоты фанерозоя (начиная с кембрийского периода и до настоящего времени).

Понятно, что исследователи заинтересованы в классификации по возможности с максимальной степенью детализации, например на уровне отдельных видов. Тем не менее, точность, с которой можно определить время возникновения и гибели отдельного вида, зависит от числа известных ученым ископаемых останков, принадлежащих данному виду. В том случае, если таких останков мало, велика вероятность ошибки при определении соответствующих дат. Как правило, в подобных случаях время вымирания оказывается заниженным, т.е. датируется более ранним сроком, чем это произошло на самом деле (так называемый эффект Сигнора—Липпса (Signor—Lipps effect) (Signor et al., 1982)). Обратный эффект заключается в том, что для биологического вида, слабо представленного ископаемыми остатками, время его возникновения датируется более поздним сроком. Исследования на уровне более высоких таксонов станут более объективными.

Время, которым датируется возникновение или гибель того или иного вида, относят к ближайшему геологическому веку (см. геохронологическую шкалу на с. 169), который представляет собой интервал геологического времени, определяемого, как правило, на основе относительной геохронологии. Этот способ датирования кажется весьма удобным и является общепринятым, что, к сожалению, порождает ряд проблем. Так, границы общепринятых геологических эпох не известны с достаточной степенью точности и до настоящего времени оспариваются, как оспариваются и сами эпохи. Другой досадной проблемой является тот факт, что геологические века и эпохи имеют разную длительность. Так, средняя длительность геологического века в фанерозое составляет при-

Геохронологическая шкала



мерно 7,3 млн лет, однако длительность каждого из веков находится в диапазоне от 1 до 20 млн лет.

Для того, чтобы количественно охарактеризовать глобальные процессы изменения биологического разнообразия, существует несколько показателей. Исходными данными для всех расчетов являются:

- общее число таксонов, существовавших на протяжении какого-либо отрезка геохронологической шкалы (так называемое таксономическое разнообразие);
- число вновь появившихся на его протяжении таксонов;
- число вымирающих таксонов.

Остальные величины могут быть получены на основе этих данных. Понятно, что само по себе число вымерших таксонов в течение какого-либо геологического века не является достаточно показательным, так как геологические века (как было сказано выше)

имеют различную длительность. Для того, чтобы уменьшить подобный эффект, стало общепринятым при проведении подобных исследований изучать не только общее число таксонов (видов, родов, семейств), вымерших в тот или иной век, но и скорость вымирания (число таксонов, погибших в единицу времени).

Сказанное иллюстрирует рис. 3.1: на рисунке (а) приведено число семейств известных морских организмов, вымерших в различные геологические периоды фанерозоя: каждая точка показывает число семейств, вымерших в один геологический век. На рисунке (б) приведены те же данные, однако они «отнормированы» с учетом того, что геологические века имеют разную длительность: показано число семейств, вымерших в единицу времени, которая выбрана равной 1 млн лет. Видно отличие между этими рисунками: на рис. 3.1 (б) отчетливо видно, что интенсивность вымираний спадает с течением времени, что незаметно на рис. 3.1 (а).

Однако такой показатель, как скорость вымирания, включает в себе ошибки. Понятно, что если необходимо определить скорость вымирания биологических видов, то нужно поделить число вымерших видов на длительность соответствующего геологического периода. Однако если вымирание происходило не равномерно, а были моменты, когда вымирало большое число видов (многие исследователи полагают, что именно так оно и было), то

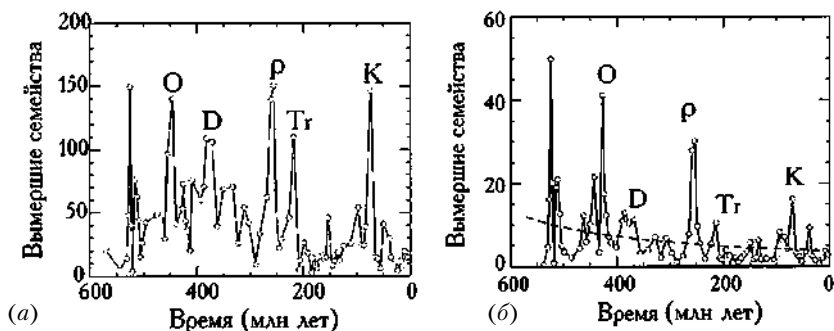


Рис. 3.1: (а) Число семейств известных морских организмов, вымерших в геологические периоды фанерозоя, как функция времени. Показано число семейств, вымерших в каждый геологический век. Рисунок, основанный на данных из (Sepkoski, 1993), взят из работы (Newman et al., 2003):

О — Ордовикский, D — Девонский, P — Пермский, Tr — Триасовый, K — Меловой периоды; (б) Те же самые данные, нормированные на продолжительность геологических веков: показано число семейств, вымерших в единицу времени (1 млн лет). Отчетливо видно, что интенсивность вымираний спадает с течением времени. Пунктирной линией обозначено усредненное число вымерших видов в зависимости от времени

тогда полученные результаты будут неточными, так как отражают слишком усредненную картину. Так, вымирание достаточно большого числа биологических видов во время короткого геологического века даст аномально высокую скорость вымирания, независимо от того, увеличилась эта скорость на самом деле или нет по сравнению с соседними, более продолжительными веками. Наконец, большие ошибки связаны с неточностью и разноречивостью геохронологических шкал. Длительность большинства подразделений этих шкал установлена с некоторой ошибкой (которая обычно указывается). Это означает, что реальная длительность находится в некоторых пределах и первоначально необходимо подсчитать скорости вымирания для крайних пределов длительности. В этом случае будет ясен интервал, в котором может находиться истинное значение данного показателя. Для того, чтобы избежать подобных ошибок, вводят в рассмотрение также такие показатели, как уровень вымирания, фоновый уровень вымирания и интенсивность вымирания.

Под уровнем вымирания понимают количество вымирающих таксонов, выраженное в процентах от общего числа существовавших в течение данного отрезка времени. Этот показатель косвенно учитывает длительность подразделений геохронологической шкалы, поскольку за более длительный период будет выше суммарное разнообразие и больше число вымирающих таксонов. При этом он не вносит искажений, связанных с существенными неточностями имеющихся геохронологических шкал, когда определяются скоростные показатели.

Фоновый уровень вымирания — это средняя величина уровня вымирания, рассчитанная для нескольких ближайших (5—10) отрезков времени, которые можно считать «спокойными». Этот показатель необходим для того, чтобы оценить степень вымирания на каком-либо рубеже, поскольку фоновый уровень вымирания будет своим для каждой систематической группы, каждого таксономического уровня и для каждого момента.

Наконец, интенсивность вымирания — это отношение уровня вымирания на критическом рубеже к фоновому уровню вымирания. Только этот показатель позволяет объективно сравнивать степень вымирания различных систематических и экологических групп, разных таксономических категорий, хотя и он не свободен от недостатков. Так, в случае исключительно высокого фонового уровня вымирания даже полное исчезновение группы будет выражаться лишь небольшим повышением интенсивности вымира-

ния, и наоборот, если фоновый уровень вымирания равен нулю, то любое вымирание даже одного таксона дает бесконечную величину интенсивности вымирания.

Использование геологических эпох в качестве временной шкалы порождает и другие сложности. Например, как уже упоминалось выше, иногда экземплярам одного и того же биологического вида, ископаемые останки которых принадлежали различным геологическим эпохам, присваивались разные названия (Raup et al., 1988). Таким образом, из-за границ геологических веков появлялись «дополнительные» вымирания — считалось, что данный биологический вид вымер, хотя он благополучно пережил смену эпох, но «числился» в другой эпохе под другим именем.

Еще одна сложность заключается в том, что разнообразие видов возрастает по мере движения в настоящее. Действительно ли это так, или же это связано с тем, что более поздние ископаемые останки имеют тенденцию лучше сохраняться, их проще отыскивать — этот вопрос остается открытым.

Существуют и другие сложности при исследовании рождения и гибели биологических видов. Так, например, явный пик видообразования может являться причиной усердной работы исследователя (или группы исследователей) по изучению определенного геологического периода. Большое число видов, возникших во время короткого периода по сравнению с другими периодами, может объясняться лишь тем, что данный период изучен существенно лучше других за счет интенсивной работы исследователей. Сходной причиной искажения и «перекосов» палеонтологических данных может являться внесение в базу данных новых записей, явившихся следствием раскопок на новом и богатом ископаемыми останками участке, что может усиливать неравномерность существующих знаний.

Таким образом, для получения объективной картины различные количественные показатели, характеризующие глобальный процесс эволюции, должны разумным образом дополнять друг друга.

Еще одним источником искажений является слабое представление ископаемых останков после массового вымирания видов. Как уже было сказано выше, считается, что многие крупные случаи гибели видов (родов, семейств) вызваны изменениями окружающей среды. Эти изменения могли нарушить условия, при которых организмы становились ископаемыми и могли сохраняться. Вследствие этого виды, которые пережили случаи массового вы-

мирования достаточно хорошо, оказались слабо представлены ископаемыми останками, а следовательно, могли быть также причислены к вымершим видам.

Учитывая все вышеописанные обстоятельства, может возникнуть резонный вопрос, насколько вообще правомерно говорить о каких-либо данных и результатах, если так много неточностей и погрешностей. Тем не менее, многие исследователи в своих работах предприняли ряд усилий, чтобы «нивелировать» данные погрешности, и тот факт, что многие выводы, сделанные различными исследователями независимо друг от друга, оказываются одинаковыми, позволяет говорить о достоверности полученных результатов.

Обсудим наиболее важные данные, которые затем потребуются в дальнейшем, и начнем рассмотрение с данных о вымирании биологических видов. На рис. 3.1 (а) приведено число вымерших семейств для каждого геологического века с начала фанерозоя. Моменты времени, отвечающие событиям массового вымирания биологических семейств, могут быть опознаны по пикам на рисунке — именно в эти моменты геологического времени значительная часть биологических семейств, известных ученым, вымирала. Палеонтологи выделяют в истории глобального процесса эволюции жизни на Земле восемь случаев массового вымирания (из которых четыре известны как великие массовые вымирания), которые сопровождаются более «мелкими» случаями. Во время пяти случаев массового вымирания, отмеченных на рис. 3.1 буквами, по некоторым подсчетам, погибло более 90% биологических видов (Raup, 1979).

Как отмечалось, причины, вызывающие массовые вымирания биологических видов во время глобального эволюционного процесса, являются предметом оживленных дискуссий. Тем не менее, на сегодняшний день общепринята точка зрения, что случаи массового вымирания (если они были) обуславливались внешним воздействием на экосистему со стороны окружающей среды. Это придает вес гипотезе (разделяемой многими палеонтологами) о том, что вообще все случаи массового вымирания биологических видов обусловлены исключительно внешними воздействиями.

Противоположная точка зрения заключается в том, что крупные события вымирания действительно вызваны внешними причинами, но вот более «мелкие» случаи вымирания имеют внутреннюю, биологическую природу. В работе (Raup et al., 1988) исследовался данный вопрос путем сравнения «профилей вымирания» девя-

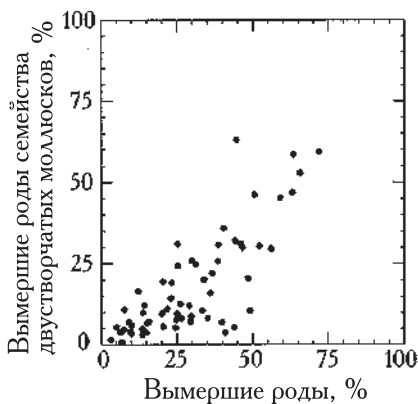


Рис. 3.2. Процент вымерших биологических родов семейства двусторчатых моллюсков, в зависимости от процента вымерших всех остальных родов, рассчитанный для каждого геологического века. Высокая степень корреляции ($r^2 = 0,78$) свидетельствует об общей причине вымирания как двусторчатых моллюсков, так и всех остальных биологических видов. Источник: Newman et al., 2003 по результатам (Raup et al., 1988)

И хотя сходство между этими профилями не было строгим, тем не менее была найдена строгая корреляция между этими группами в синхронности происхождения вымираний (рис. 3.2). Данный результат может являться доказательством того, что существует слабая избирательность классов при массовых вымираниях, что в свою очередь свидетельствует в пользу внешних причин, нежели внутренних биологических.

Однако у вышеприведенных исследований есть один недостаток — исследователь может сделать вывод о корреляции между достаточно значительными случаями вымираний, которые выделяются над уровнем шумового пьедестала. В то же самое время кажется разумной точка зрения, согласно которой все крупные случаи гибели биологических видов обусловлены внешними причинами, и одновременно наряду с этим имеются причины внутренние, внутрисистемные, существующие как бы на «заднем плане» глобального эволюционного процесса, которыми обуславливаются все другие случаи вымирания тех или иных биологических видов.

На рис. 3.3 приведена гистограмма вымерших биологических семейств морских животных. Горизонтальная ось показывает число семейств морских животных, вымерших в течение одного геологического века, вертикальная — число таких геологических веков. Видно, например, что наблюдалось 32 геологических века, когда вымирало до 25 семейств за каждый век (самый левый столбец гистограммы), 25 веков, когда вымирало от 25 до 50 семейств (второй столбец слева), и т.д. Следует обратить внимание, что результаты нескольких следующих друг за другом случаев вымира-

ти крупных групп беспозвоночных в течение фанерозоя.

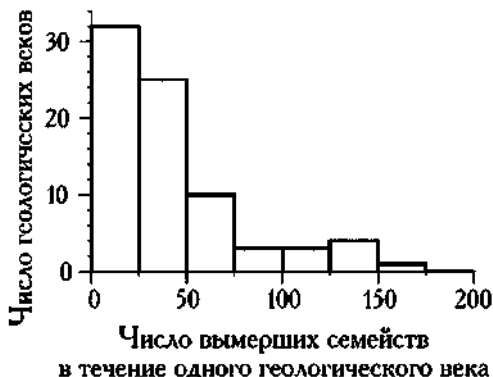
Рис. 3.3. Гистограмма, показывающая число семейств морских животных, вымерших в различные геологические века фанерозоя.

Источник: Sepkoski, 1993, взята из (Newman et al., 2003).

ний животных во время одного геологического века при построении гистограммы складываются.

Если возникают много независимых друг от друга случаев вымирания биологических видов в каждый из геологических веков, то можно ожидать, что распределение будет близко к нормальному, однако, как видно из рис. 3.3, этого не происходит — гистограмма весьма далека от гауссового распределения. Это может означать, что различные события вымирания биологических видов в разные моменты геологического времени коррелируют друг с другом, причем время корреляции имеет величину, сопоставимую или большую, нежели типичная длительность геологического века, так что случаи вымирания биологических видов в течение одного века не являются независимыми событиями (Newman et al., 1999).

В то же самое время на гистограмме нет каких-либо явных признаков, по которым можно было бы разделить события вымирания, обусловленные внешними факторами, и фоновые вымирания, причины которых кроются в самой экосистеме. Сам по себе этот факт не является аргументом против гипотезы о внутрисистемных причинах вымирания биологических видов. Даже если нет существенных количественных отличий между событиями вымираний, обусловленных внешними и внутренними причинами, могут быть серьезные качественные различия. Например (Jablonski, 1986), характерные признаки биологического вида, дававшие ему преимущества перед другими и позволявшие ему выживать во время случаев вымирания из-за внутрисистемных причин, могли существенно отличаться от особенностей, дававших преимущества видам во время событий вымираний, обусловленных внешними причинами. Таким образом, динамика вымирания биологических видов могла быть обусловлена различными факторами и происходить «в различных режимах».



В последние годы было сделано предположение о том, что распределение случаев вымирания подчиняется степенному закону, по крайней мере для значительных случаев вымирания биологических видов. Иными словами, вероятность того, что определенная часть s существующего в некоторый момент вида, рода или семейства вымрет в течение определенного временного интервала (периода), подчиняется степенному закону

$$p(s) \sim s^{-\alpha}. \quad (3.1)$$

Важную роль при анализе данных имеет форма их графического представления. Если построить степенную зависимость на графике, где по горизонтальной оси (ось абсцисс) отложена величина s , а по вертикальной (ось ординат) — $p(s)$, то получится некоторая кривая, достаточно быстро уменьшающаяся с ростом величины s . Качественно примерно такой же характер поведения будет и у зависимости, спадающей экспоненциально (рис. 3.4, *а*). При работе с реальными данными отличить визуально («на глаз») одну зависимость от другой оказывается практически невозможно. В этом случае приходится аппроксимировать анализируемые данные — строить на этом же графике соответствующую аналитическую кривую (например, экспоненту или степенной закон) и подбирать значения параметров, используя соответствующие математические методы (например, метод наименьших квадратов), чтобы эта кривая наилучшим образом «ложились» на существующие данные.

В то же самое время есть простой способ определить характер анализируемой зависимости. Если построить степенную зависимость в двойном логарифмическом масштабе, т.е. откладывать по осям не величины s и $p(s)$, а $\lg s$ и $\lg p(s)$, то, как нетрудно увидеть, логарифмируя (3.4), ее графиком будет прямая линия

$$\lg p(s) \sim -\alpha \lg s. \quad (3.2)$$

Экспоненциальная зависимость при построении в двойном логарифмическом масштабе будет представлена на рисунке кривой (рис. 3.4, *б*). Таким образом, глядя на рисунок, можно сразу же увидеть качественное различие в поведении этих кривых и четко сказать, что если данные расположены на прямой линии при построении их в логарифмическом масштабе, то соответствующая зависимость имеет степенной характер.

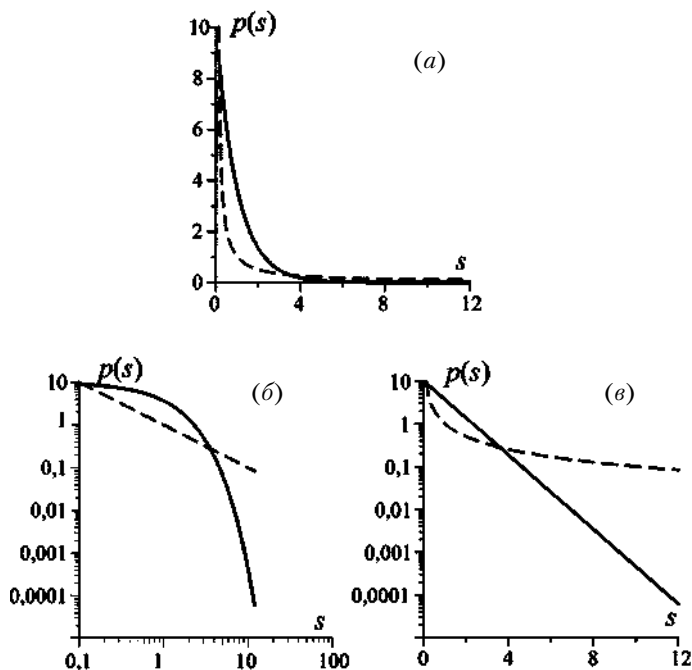


Рис. 3.4. Степенная (пунктирная линия) и экспоненциальная (сплошная линия) зависимости, показанные на одном графике: (а) оси выбраны в линейном масштабе, (б) логарифмический масштаб (ось ординат представлена в логарифмическом масштабе, ось абсцисс — в линейном) и (в) двойной логарифмический масштаб

В то же самое время, глядя на сплошную кривую на рис. 3.4, б, нельзя однозначно сказать, является ли она экспоненциальной, поскольку и другие зависимости в двойном логарифмическом масштабе могут быть представлены кривыми линиями. Поэтому двойной логарифмический масштаб позволяет однозначно выделить лишь один класс зависимостей — степенной. Для того чтобы также однозначно сказать, что анализируемые данные подчиняются экспоненциальному закону, необходимо представить их в логарифмическом масштабе, когда ось абсцисс отложена в линейном, а ось ординат — в логарифмическом масштабах. В этом случае только экспоненциальная зависимость будет характеризоваться прямой линией (см. рис. 3.4, в).

На рис. 3.5 приведены те же самые данные, что и на рис. 3.3, отложенные в логарифмическом масштабе. Видно, что данные вроде бы ложатся на прямую линию, соответствующую степенно-



Рис. 3.5. Данные рис. 3.3, построенные в двойном логарифмическом масштабе. Прямая линия соответствует степенному закону (3.2). На врезке приведена гистограмма продолжительности существования биологических родов (Newman, 2000)

му закону, однако вероятные ошибки (также приведенные на рисунке) слишком велики, а количество точек мало для того, чтобы с уверенностью говорить о степенном законе распределения. Вполне возможен также экспоненциальный характер распределения точек. Одним из возможных способов преодолеть недостаток данных является ранжирование соответствующих геологических веков: веку, в котором вымерло наибольшее количество таксонов, присваивается первый ранг, второму по числу вымерших таксонов веку присваивается ранг 2 и т.д. Тогда можно построить зависимость числа вымерших таксонов в течение одного геологического века от его ранга. Было показано (Zipf, 1949), что если какое-либо распределение удовлетворяет степенному закону, то его ранжированное распределение также будет удовлетворять степенному закону. Более того, ранжированное распределение более удобно в том плане, что не происходит редукции (уменьшения) числа данных, как при построении соответствующей гистограммы.

На рис. 3.6 приведено соответствующее ранжированное распределение числа вымерших семейств морских животных в течение одного геологического века (для фанерозоя) в зависимости от ранга этого века. Видно, что подобное ранжированное распределение более наглядно, нежели на рис. 3.5. Видно, что точки распределения хорошо соответствуют степенному закону до веков, в которые вымерло более 40 семейств, затем наблюдается отклонение, которое, может быть, связано либо с неточностями данных, либо с тем, что это распределение соответствует не степенному, а, допустим, экспоненциальному (или какому-либо еще) закону. Более глубокий анализ (Newman, 1996) также не внес окончательной ясности в данный вопрос, однако большинство исследователей

Рис. 3.6. Зависимость числа вымерших семейств морских животных в течение одного геологического века от его ранга. Прямая линия соответствует степенному закону (3.2). Зависимость показана в двойном логарифмическом масштабе (Newman, 2003)

склоняются к тому, что распределение числа вымерших биологических видов подчиняется скорее степенному,

нежели экспоненциальному закону. Более того, определен (с соответствующей точностью) коэффициент α в соотношении (3.1), значение которого составляет 2.0 ± 0.2 .

Другой интригующей особенностью эволюционного процесса (на которую было обращено внимание в 1984 г. (Raup et al., 1984)) является то, что случаи массового вымирания биологических видов за последние 250 млн лет повторяются с периодичностью (примерно) в 26 млн лет (см. рис. 3.7, а также (Raup et al., 1986; Raup et al., 1988; Sepkoski, 1990)). Ряд ученых склоняется к объяснению этого явления с помощью астрономических событий. Так, по одной из версий (Леонович, 1994), у Солнца существует никем не обнаруженная звезда—напарница, вращающаяся по очень вытянутой орбите с периодом, составляющим как раз эти самые 26 млн лет. В моменты наибольшего сближения с Солнцем на

Земле происходят серьезнейшие изменения, вызывающие массовую гибель

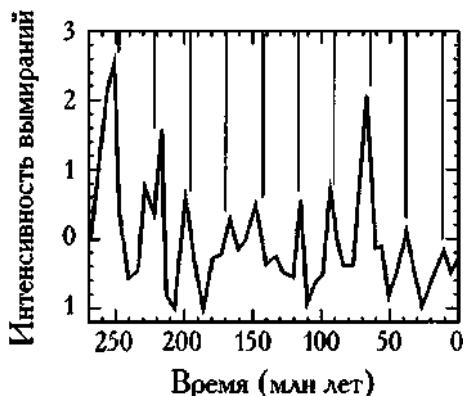
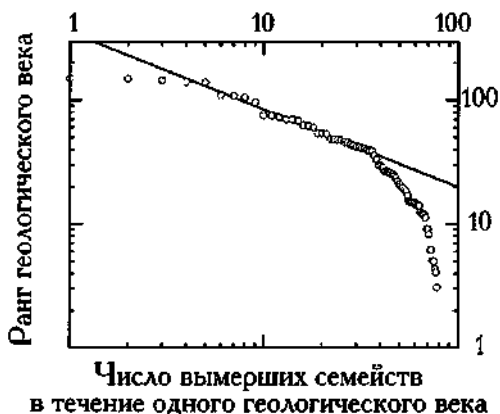


Рис. 3.7. Число родов морских беспозвоночных животных, вымерших за последние 270 млн лет. По вертикальной оси отложено отклонение от средней скорости вымирания. Вертикальные полосы обозначают период в 26 млн лет, через которые повторяются пики вымирания (Sepkoski, 1990)



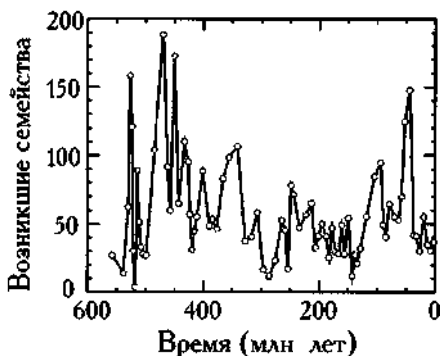


Рис. 3.8. Число семейств известных морских животных, появившихся в каждый геологический век фанерозоя как функция времени. Рисунок, основанный на данных (Sepkoski, 1993), взят из работы (Newman et al., 2003)

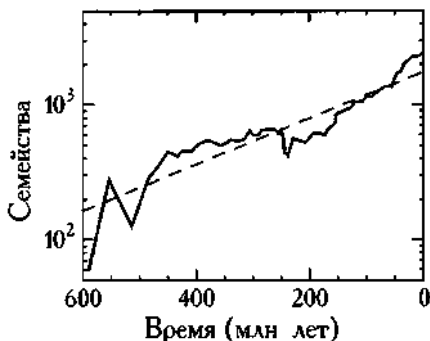
ошибками, связанными со слабой классификацией (Patterson et al., 1987; Patterson et al., 1989) и неточной датировкой рубежей в существующих геохронологических шкалах.

Непосредственно с исследованием процесса вымирания биологических видов связано изучение «обратного» и не менее глобального процесса — зарождения новых видов. Как ни странно, этот вопрос изучен не так детально, как вымирание видов. Наиболее очевидным фактом является то, что «всплеск» образования новых видов следует непосредственно за массовым вымиранием (рис. 3.8).

Сравнение рис. 3.8 с рис. 3.1 показывает, что пики возникновения новых семейств соответствуют всем пикам вымираний, хотя, конечно же, соответствие этих кривых неточное. Наиболее типичное объяснение этому заключается в том, что для новых биологических видов оказывается проще занять существующие пустые экологические ниши, возникшие в результате массовых вымираний, и вслед за пиком вымирания биологических видов следует всплеск появления новых, занимающих пустующие экологические ниши. После того, как все экологические ниши оказываются заполненными, процесс образования новых биологических видов замедляется.

На основе этого многими учеными делается вывод о том, что существует определенный уровень насыщения числа биологических видов, которые могут существовать в экосистеме, остающийся постоянным, за исключением моментов времени, следующих после массовых вымираний. Тем не менее, эта точка зрения оказывается в настоящий момент спорной. С одной стороны, современные экологические данные свидетельствуют в поддержку этой гипотезы (Rosenzweig, 1995), с другой — на длительных временных мас-

Рис. 3.9. Полное число известных семейств как функция времени (фанерозой). Вертикальная ось имеет логарифмический масштаб, пунктирная линия соответствует экспоненциальному росту (Newman et al., 2003)



штабах разнообразие видов нарастает (рис. 3.9), так как животные открывают возможность использования новых сред обитания.

Из сопоставления кривой, отвечающей общему числу известных биологических семейств, с пунктирной линией, соответствующей экспоненциальному росту, можно сделать вывод о том, что число семейств нарастает экспоненциально, хотя вполне возможен и логистический рост.

Рисунок 3.9 также показывает, что нарастание биологического разнообразия прерывается массовыми вымираниями, после чего число семейств уменьшается. Была разработана иная модель, согласно которой разнообразие морских организмов испытывает более или менее длительные периоды роста и насыщения, описываемые различными логистическими уравнениями. Эти периоды прерываются кратковременными массовыми вымираниями.

Каждый сегмент роста разнообразия определяется начальным уровнем разнообразия сразу после массового вымирания, начальной скоростью роста и последующим уровнем равновесия. Чем интенсивнее массовое вымирание, тем выше уровень последующего равновесного разнообразия. В то же самое время, как отмечалось, явление нарастания биологического разнообразия может быть обусловлено и тем, что более поздние ископаемые останки имеют тенденцию лучше сохраняться, их проще отыскивать, а, следовательно, нарастание разнообразия биологических видов может быть кажущимся. Во всяком случае, на сегодняшний день нет причин делать вывод о том, что существует верхний предел разнообразия биологических видов на Земле.

Еще одной характерной чертой эволюционного процесса является распределение времен существования биологических видов (родов, семейств), подобно той, которая приведена на рис. 3.10 (см. также врезку на рис. 3.5). На первый взгляд кажется, что распределение времен существования биологических родов подчиня-

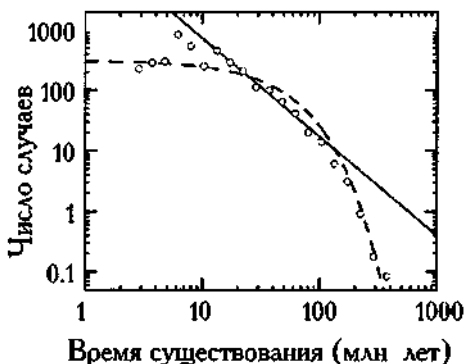


Рис. 3.10. Частотное распределение времени существования биологических родов морских животных. Непрерывная линия соответствует степенному закону распределения, пунктирная — экспоненциальному. График показан в двойном логарифмическом масштабе (Newman et al., 1999)

ется экспоненциальному закону. Тем не менее, ряд исследователей склоняется к выводу, что это распределение все-таки описывается степенным законом.

Если внимательно посмотреть на рис. 3.10, можно заметить, что в интервале длительностей от 10 до 100 млн лет действительно наблюдается хорошее соответствие данных степенному закону, в то время, как для длительностей существования меньше 10 и больше 100 млн лет имеет место существенное отклонение данных от ожидаемой прямой линии. Тем не менее, исследователи считают, что соответствующие данные о биологических родах, длительность существования которых меньше 10 млн лет и больше 100 млн лет, просто-напросто недостаточно полно представлены в соответствующих базах данных за счет систематических ошибок. Во-первых, биологические роды, возникающие и вымирающие в течение одного геологического века, в соответствии с принятой классификацией имеют длительность, равную нулю, и поэтому не представлены в распределении. Следовательно, биологические роды, продолжительность существования которых меньше средней длительности одного геологического века, равной примерно 7 млн лет, будут представлены недостаточно полно, и точки на графике будут лежать ниже линии, отвечающей степенному закону.

Во-вторых, как уже говорилось выше, один и тот же вид может называться по-разному в разные геологические века, особенно если этот вид существовал до и после основных, наиболее значительных временных границ. Поэтому биологические виды, длительность существования которых достаточно большая, тоже не полно представлены в распределении. Этот эффект проявляется на длительностях более 100 млн лет. Следовательно, наиболее до-

стоверны данные о биологических родах, продолжительность существования которых лежит в интервале от 10 до 100 млн лет. Их распределение, как видно из рис. 3.10, наиболее хорошо соответствует степенному закону (прямая сплошная линия на рисунке).

Основываясь на существующих данных, можно определить показатель α для степенного закона распределения. Вычисления дают $\alpha = 1,6 \pm 0,1$, однако это значение зависит от выбора верхней и нижней границ достоверности данных. Поэтому считается, что показатель α лежит в диапазоне от 1,2 до 2,2.

Отметим еще один интересный факт: в 1922 г. было обнаружено, что если подсчитать число биологических видов n_s в каждом роде и построить соответствующую гистограмму числа существующих родов n_g для каждого значения n_s , то получившееся распределение будет весьма близко к степенному закону (Willis, 1922)

$$n_g \sim n_s^{-\alpha}. \quad (3.3)$$

На рис. 3.11 воспроизведен результат из работы (Willis, 1922) для числа видов в каждом роде цветковых растений. Измеренный в данном случае коэффициент β составляет $1,5 \pm 0,1$. Позднее (Burlando, 1990; Burlando, 1993) данные результаты были расширены для числа родов в семействе, числа семейств в отряде и т.д. Оказалось, что и в этих случаях соответствующие распределения также подчиняются степенному закону. Фактически получается, что классификационное дерево видов, родов, семейств и т.п. имеет фрактальную структуру. В ряде случаев, например, когда скорости возникновения новых видов и вымирания существующих совпадают, степенное распределение гистограмм для числа видов, родов, семейств и т.п. оказывается следствием степенного распределения длительностей существования различных видов (Newman et al., 2003). Этот факт тем более важен, так как соответствующие выводы сделаны на основе принци-

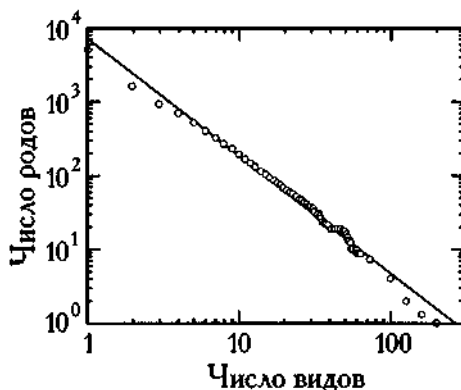


Рис. 3.11. Гистограмма числа видов в роде для цветковых растений. Непрерывная линия соответствует степенному закону (Willis, 1922)

пиально других данных — на основе анализа информации о ныне существующих биологических видах, а не на базе палеонтологических данных, которые служили информационной основой для всех изложенных выше результатов.

3.3. Нелинейные модели, описывающие закономерности возникновения и вымирания биологических видов

С появлением достаточно полных баз данных, содержащих в себе информацию о вымерших биологических видах, с одной стороны, и достаточно мощных компьютеров, способных оказать реальную помощь исследователю в обработке этих данных — с другой, был предложен ряд простых моделей, призванных объяснить и понять закономерности глобального эволюционного процесса. Одна из таких моделей, предложенная Ван Валеном (Van Valen) (Van Valen, 1973) в 1973 г., предполагает, что вероятность p вымирания биологического вида в единицу времени не зависит от времени t . Другими словами, можно сказать, что вероятность пережить определенный временной интервал длительностью T падает для биологического вида экспоненциально с ростом T . Действительно, если p — вероятность того, что рассматриваемый биологический вид вымрет за единицу времени, то $(1-p)$ — вероятность того, что данный биологический вид благополучно переживет единичный временной интервал, а

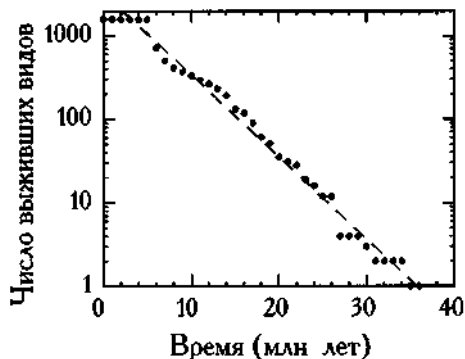
$$P(T) = (1-p)^T = e^{-T/\tau} - \quad (3.4)$$

вероятность того, что этот вид выживет в течение периода времени длительностью T , где

$$\tau = -\frac{1}{\lg(1-p)}. \quad (3.5)$$

Ван Вален использовал соотношение (3.4) для того, чтобы подтвердить свое предположение, построив графики зависимости числа выживших видов из некоторой начальной группы от времени. Иными словами, он выбирал группу биологических видов и подсчитывал, сколько из них оказывались представленными ископаемыми останками после временного интервала длительностью T . Получилось, что временная константа τ различна для различных групп животных, исследованных Ван Валеном, а кривая соответствующей зависимости действительно экспоненциально

Рис. 3.12. Число родов млекопитающих, выживающих из начальной группы в 1585 родов, в течение периода длительностью 36 млн лет. Штриховая линия соответствует лучшему приближению экспоненциальным законом, $\tau = 4,41 \pm 0,08$ млн лет (Van Valen, 1973)



падает с течением времени (см. рис. 3.12). Этот результат известен как закон Ван Валена. Подобные зависимости Ван Вален получил и для других групп родов и семейств.

Тем не менее, закон Ван Валена по ряду причин не может быть корректным. Во-первых, даже если эволюция биологических видов действительно подчиняется экспоненциальному закону (3.4), соответствующая кривая для родов не может быть экспоненциальной, поскольку она зависит не только от коэффициента вымирания p , но и от коэффициента видообразования q . Соответствующая же кривая S будет определяться соотношением (Raup, 1991)

$$S = 1 - \frac{p \left[e^{(q-p)t} - 1 \right]}{q e^{(q-p)t} - p}, \quad (3.6)$$

где q — средний коэффициент видообразования внутри рода. Аналогичные выводы справедливы и для более высоких уровней классификации. Во-вторых, модель Ван Валена, так же как и теория Дарвина, не описывала массовых вымираний организмов.

В 1993 г. Бак и Снеппен (Bak et al., 1993) предложили сравнительно простую модель для описания глобального процесса эволюции сообществ. В рамках этой модели предполагается, что для каждого биологического вида имеется свой профиль приспособляемости, своего рода зависимость, показывающая, насколько хорошо данный биологический вид приспособлен к существованию в данных условиях, в зависимости от генотипа данного вида. Подобный профиль (или, как еще называют, ландшафт) существует в многомерном пространстве генотипа, однако для простоты и наглядности будем его изображать одномерным, как на рис. 3.13.

В процессе эволюции биологический вид «путешествует» по своему ландшафту приспособляемости. Организмы данного вида,

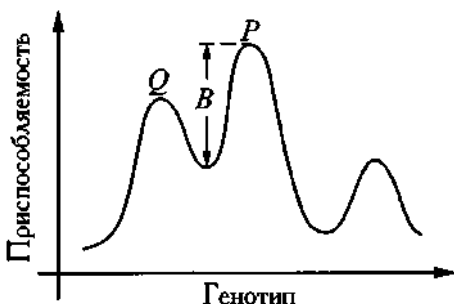
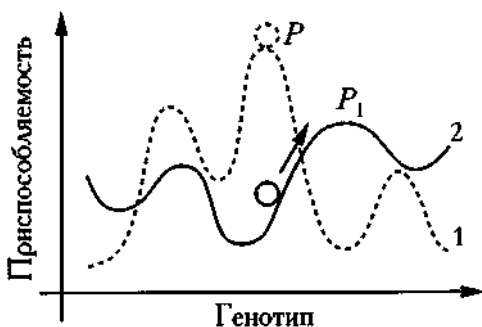


Рис. 3.13. Схематичное изображение ландшафта приспособляемости. Для того, чтобы эволюционировать к локальному максимуму Q , биологический вид, находящийся в локальном максимуме P , должен преодолеть барьер B . Величина барьера показывает, насколько тяжело биологическому виду достичь нового пика (Newman, 2000)

имеющие генотип с более высоким значением приспособляемости W , оказываются более приспособленными к существованию и вытесняют своих «собратьев» по виду с другим, менее удачным генотипом. Таким образом, с течением времени биологический вид сдвигается по своему ландшафту в некоторый локальный максимум. Именно локальные максимумы, которых может быть несколько, представляют собой устойчивые состояния равновесия системы. Достигнув любого локального максимума ландшафта, эволюция вида останавливается. Для того, чтобы переместиться из одного локального максимума (который может быть неоптимальным) в другой, биологический вид должен преодолеть барьер, определяемый высотой пика ландшафта, в котором он находится (см. рис. 3.13), и глубиной соседней впадины. Чем больше высота барьера, тем труднее биологическому виду его преодолеть и переместиться в другой максимум. Очевидно, что читатель без труда увидит аналогию с потенциальным барьером, столь широко распространенным в физике.

Тем не менее, по ряду причин эволюция вида не прекращается. Во-первых, из-за изменения условий существования, обусловленных внешними причинами, ландшафт приспособляемости может

Рис. 3.14. Изменение ландшафта приспособляемости биологического вида в результате изменения условий существования под действием внешних факторов. Биологический вид, ранее находившийся в локальном максимуме P (ландшафт 1) и являвшийся стабильным, вынужден эволюционировать к вновь возникшему локальному максимуму P_1 (ландшафт 2)



существенно изменяться, и биологический вид, находившийся ранее в локальном максимуме и являвшийся стабильным, может оказаться в другой точке и вынужден будет снова эволюционировать к новому состоянию равновесия (рис. 3.14).

Во-вторых, эволюционные изменения возможны и без значительных изменений экосистемы, например, когда некоторые из животных данного биологического вида претерпевают существенную мутацию (или быструю последовательность малых мутаций) таким образом, что они оказываются на ландшафте в бассейне притяжения другого локального максимума. Наконец, эволюция возможна в результате межвидового взаимодействия, так как биологические виды не являются независимыми друг от друга и эволюция одного из них может вызвать эволюцию другого. Так, например, если в экосистеме «хищник—жертва» биологический вид жертвы эволюционировал таким образом, что обрел способность летать, то вид хищника должен либо тоже эволюционировать подобным образом, либо эволюционировать так, чтобы перейти на другой вид пищи, либо, наконец, погибнуть. Подобный процесс носит название коэволюции.

Бак и Снеппен (Bak et al., 1993; Bak, 1996; Sneppen, 1995), базируясь на описанных выше представлениях, предложили простую и красивую модель глобального процесса эволюции биологических видов. Рассмотрим N различных биологических видов в экосистеме, каждый из которых находится в локальном максимуме своего ландшафта приспособляемости. Каждый из видов взаимодействует с рядом других, причем способ взаимодействия может быть выбран весьма произвольно. Одним из простейших способов является расположение N биологических видов в решетку и предположение о том, что каждый из видов взаимодействует только со своими локальными соседями. Пока все биологические виды находятся в локальных максимумах, в системе ничего не происходит. Как только один из видов претерпевает мутацию (или последовательность мутаций) и оказывается в бассейне притяжения другого локального максимума ландшафта, начинается процесс эволюции, приводящий к тому, что вид достигает нового локального максимума.

Понятно, что для того, чтобы система начала эволюционировать, она должна преодолеть один из N барьеров B_i (по аналогии с потенциальным барьером в физике), и разумно считать, что в результате мутации будет преодолен наименьший из всех существующих барьеров, т.е. j -ый биологический вид, имеющий наимень-

ший барьер B_j , будет эволюционировать первым. Как только этот j -ый биологический вид преодолевает барьер B_j , он начнет двигаться по ландшафту приспособляемости к новому локальному максимуму (с новым барьером B_j) и достигнет его, одновременно изменив профиль ландшафтов приспособляемости тех биологических видов, с которыми он взаимодействует. Таким образом, эти виды также будут вовлечены в процесс эволюции и вынуждены будут эволюционировать к новому локальному максимуму нового ландшафта (с новыми величинами барьеров).

Бак и Снеппен сделали упрощающее предположение о том, что ландшафты приспособляемости «соседних» биологических видов полностью случайны. Также было сделано предположение о том, что «соседи соседей» уже не вовлекаются в процесс эволюции, и, таким образом, данный этап эволюции заканчивается и начинается следующий: другой биологический вид, имеющий наименьший барьер, претерпевает мутацию и вынужден эволюционировать.

Таким образом, модель Бака и Снеппена можно сформулировать следующим образом:

1. N видов располагают в решетке, и для каждого i -ого вида случайным образом выбирается величина барьера B_i . Бак и Снеппен использовали равномерное случайное распределение между 0 и 1 ($0 \leq b_i < 1$).

2. Среди этих видов находится j -ый вид с наименьшим по величине барьером, и барьер этого вида заменяется другим, значение которого также выбирается случайным образом. Данная операция означает, что биологический вид с минимальным барьером был выведен мутацией из состояния равновесия и эволюционировал к новому локальному максимуму с новым барьером.

3. Для ближайших K соседей по решетке эволюционировавшего j -ого вида также случайным образом выбираются новые значения барьеров, в простейшем случае одномерной цепочки $K = 2$. Подобным образом моделируется изменение ландшафтов приспособляемости биологических видов, взаимодействовавших с j -ым видом и их эволюция к новым локальным максимумам с новыми барьерами.

4. Повторение проделанных операций, начиная с п. 2.

Рассмотрим динамику системы при многократном последовательном выполнении пунктов 2–4. Изначально величины барьеров для N биологических видов распределены равномерно случайным образом между 0 и 1. Если число видов N достаточно большое, то велика вероятность того, что наименьшая величина

барьера будет весьма близка к нулю. Предположим, что j -ый вид имеет наименьший барьер B_j . В соответствии с пунктом 2 заменим его новым значением, выбранным случайным образом. Поскольку старое значение B_j было очень близко к нулю, весьма велика вероятность того, что новая величина барьера для j -ого вида будет больше старого. Если биологические виды «размещены» в одномерной цепочке, то в соответствии с п. 3 будут случайным образом изменены величины барьеров для соседних биологических видов $j-1$ и $j+1$. Понятно, что и в этом случае велика вероятность того, что величины новых барьеров B_{j-1} и B_{j+1} будут больше, чем величина старого барьера j -ого вида B_j , хотя совершенно необязательно, чтобы новые величины барьеров для видов $j-1$ и $j+1$ были больше старых.

Таким образом, выполнение пп. 2–4 приводит, как правило, к увеличению значения минимального барьера; «планка», соответствующая наименьшему значению из N барьеров, поднимается. Последующее выполнение пп. 2–4 снова приводит к повышению наименьшего значения барьера, но по мере того, как осуществляется все большее число итераций, все более и более уменьшается вероятность того, что случайным образом выбранное новое значение барьера в пп. 2, 3 окажется больше этого уровня, который будем называть критическим.

Сказанное иллюстрирует рис. 3.15: начальное распределение барьеров B_i «поднимается» вверх, образуя окно между нулевым и критическим уровнями. По истечении определенного времени распределение величин барьеров B_i приходит к динамическому состоянию равновесия, в котором значение критического уровня (величина наименьшего барьера) слегка превышает $2/3$ (а именно $B_c = 0,66702 \pm 0,00003$).

Рассмотрим теперь, что происходит в системе, когда она достигла своего состояния динамического равновесия. Вид с наименьшим по величине барьером B_j находится на границе «окна», на критическом уровне. В соответствии с пп. 2, 3 для данного вида и его ближайших соседей случайным образом выбираются новые значения величин барьеров. Но поскольку теперь величина критического уровня оказывается достаточно большой, велика вероятность того, что по крайней мере одно из вновь найденных значений величин барьеров для j -ого вида и его соседей окажется ниже существовавшего критического уровня, попадет в пустующее окно. Это означает, что данный вид, величина барьера которого попала в «окно», будет иметь наименьший барьер, и именно

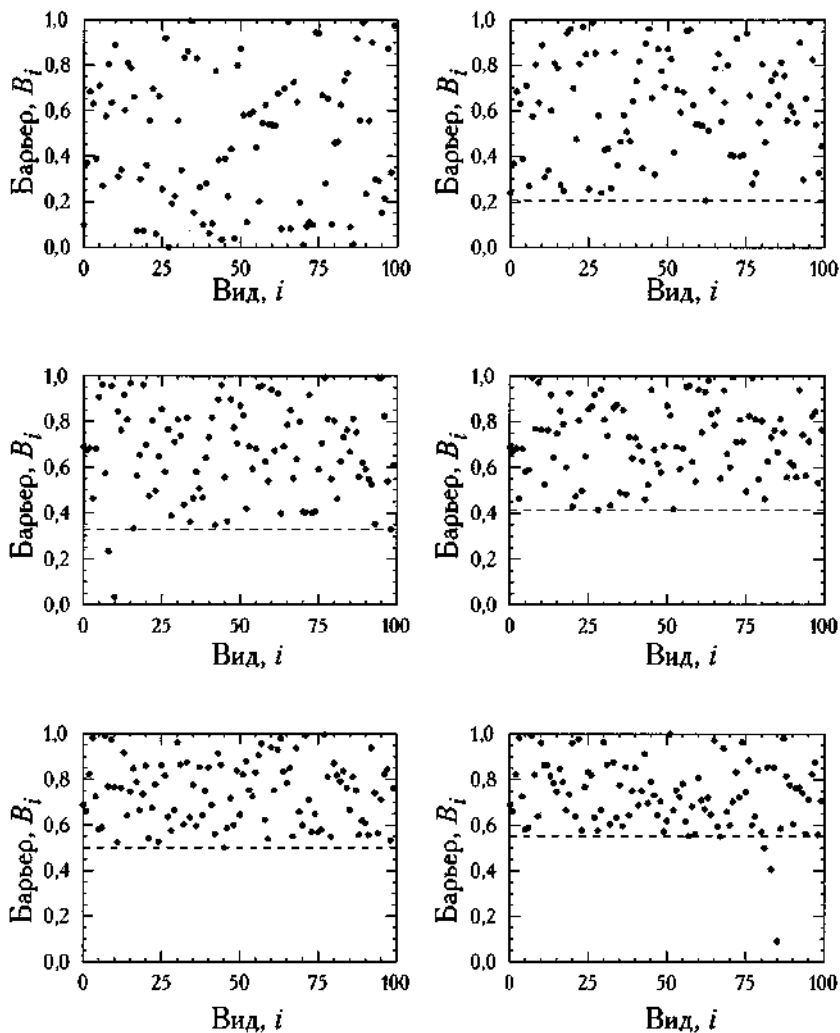


Рис. 3.15. Значения барьеров B_i для одномерной цепочки из 100 видов модели Бака и Снеппена после 50, 100, 200, 400, 800 и 1600 итераций. Пунктирная линия на каждом рисунке обозначает приблизительную позицию наименьшего из всех существующих барьеров (критический уровень). На некоторых рисунках несколько видов имеют значения барьеров меньше критического уровня, что означает, что данные виды принимают участие в эволюционной лавине в соответствующий отрезок времени (Newman et al., 2003)

с этого вида начнется следующий этап эволюции в соответствии с п. 4.

Таким образом, в рассматриваемой системе возникает эволюционная лавина: вид, начинающий эволюционировать, оказывается ближайшим к виду, начавшим эволюционировать перед этим. Соседние биологические виды последовательно и лавинообразно вовлекаются в процесс эволюции. Эволюционная лавина продолжается до тех пор, пока все вновь найденные значения барьеров не окажутся выше критического уровня (по теории вероятностей такое также вполне возможно). В этом случае лавина заканчивается, и следующий этап эволюции начнется с вида, имеющего наименьшую величину барьера, но не являющегося соседним для видов, которые были вовлечены в только что завершившуюся эволюционную лавину. Именно этот вид и будет первым видом в новой эволюционной лавине.

Число видов, вовлеченных в эволюционную лавину, будет меняться от лавины к лавине. Понятно, что вполне возможно возникновение эволюционных лавин и раньше, пока система не достигла состояния динамического равновесия, однако по мере того, как увеличивается значение критического уровня и система приближается к равновесному состоянию, масштабы эволюционных лавин увеличиваются. Поскольку возникновение эволюционных лавин обуславливается межвидовым взаимодействием и фактически происходит процесс коэволюции, данные лавины называют также коэволюционными.

Обратим внимание еще на один момент: предполагается, что чем больше значение мутационного барьера j -ого вида B_j , тем больше времени требуется для того, чтобы произошел процесс эволюции. Следовательно, каждый шаг дискретного времени в модели Бака и Снепшена будет иметь разную длительность в «реальном» времени, которая пересчитывается по формуле

$$t = t_0 e^{B_j/T}, \quad (3.7)$$

где t_0 и T — постоянные величины.

Не следует, однако, думать, что в состоянии динамического равновесия эволюционный процесс состоит лишь из одних эволюционных лавин. Вполне возможно, что новое значение барьера для вида, начинающего коэволюционную лавину, окажется выше критического уровня, а, следовательно, лавина будет иметь единственный размер и завершится, не начавшись. На рис. 3.16 представлена динамика системы с течением времени. Каждая точка на

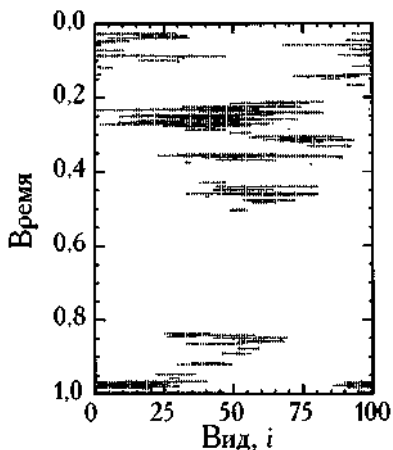


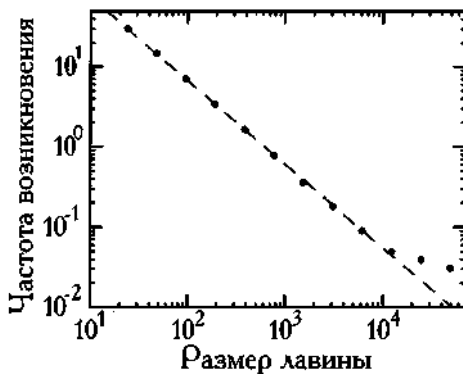
Рис. 3.16. Временная зависимость динамики модели Бака и Снеппена. Каждая точка представляет вид, вовлеченный в коэволюционную лавину. Ось времени направлена сверху вниз (Newman et al., 2003)

рисунке соответствует одному виду, вовлеченному в эволюционную лавину. На рис. 3.16 можно отчетливо видеть, что лавины отделены друг от друга временными интервалами. Размеры лавин системы, находящейся в состоянии динамического равновесия, также оказываются различными.

Фактически можно считать, что эволюционные лавины соответствуют случаям массового вымирания видов — существовавший вид перестает существовать (вымирает), а на его месте возникает новый. В случае, если в системе возникает эволюционная лавина, большое число видов заменяется новыми, происходит случай массового вымирания видов. Естественным образом возникает вопрос о том, какому закону подчиняется распределение эволюционных лавин. Оказывается, это распределение подчиняется степенному закону (см. рис. 3.17) с показателем, лежащим в диапазоне от 1 до $3/2$, в зависимости от размерности решетки (для одномерной цепочки, когда $K = 2$, он принимает значение 1), в то время как для палеонтологических данных значение этого коэффициента, как было отмечено выше, равняется примерно 2.

Отметим ряд «слабых» моментов модели Бака и Снеппена. Во-первых, вы-

Рис. 3.17. Распределение числа эволюционных лавин в модели Бака и Снеппена для одномерной цепочки ($K = 2$) с числом видов $N = 100$. Распределение очень близко к степенному закону, пунктирная линия соответствует степенному закону распределения с показателем $1,04 \pm 0,01$ (Newman et al., 2003)



мирования видов в модели Бака и Снеппена таковы, что один биологический вид, эволюционируя, порождает вид-потомок, а сам вымирает, и, соответственно, представители старого вида уже не встречаются. В то же самое время, в ходе эволюционного процесса случались и вымирания, когда существовавший биологический вид просто погибал, не эволюционируя. Во-вторых, все вымирания видов (как незначительные по величине, так и массовые) в рамках рассматриваемой модели обусловлены внутренними, внутрисистемными причинами, хотя большинство исследователей на сегодняшний день, как было указано выше, считают, что массовые вымирания организмов обусловлены исключительно внешними причинами. В-третьих, число существующих биологических видов в модели Бака и Снеппена остается неизменным, в то время, как отмечено выше, палеонтологические данные свидетельствуют о том, что разнообразие биологических видов на планете возрастало с течением времени. Наконец, отличие степенного показателя для модели Бака и Снеппена от показателя, полученного из анализа данных о вымерших видах, также может рассматриваться как недостаток этой модели. Ниже будут рассмотрены несколько модификаций модели Бака и Снеппена, целью создания которых была ликвидация названных недостатков.

В заключение рассмотрения модели Бака и Снеппена обратим внимание на тот факт, что она фактически является системой, подчиняющейся закономерностям самоорганизованной критичности (Self-Organized Criticality, SOC). Классические примеры таких систем любознательный читатель может найти в работах (Bak et al., 1987; Bak et al., 1989; Tang, 1993).

Модифицированная модель (Vandewalle, 1995), предложенная в 1995 г., является видоизменением модели Бака и Снеппена, рассмотренной выше. Как уже говорилось, в модели Бака и Снеппена вид с наименьшим значением барьера подвергался мутации, причем считалось, что этот вид вымирал, а в его экологической нише возникал новый. В то же самое время палеонтологические данные свидетельствуют о том, что весьма часто и новый, и старый виды успешно сосуществовали вместе. Поэтому в модель Бака и Снеппена были внесены изменения, позволяющие описать данное явление.

Новая модель такова: первоначально имеется очень малое число биологических видов (вполне возможно, что даже один), каждый из которых, так же как и в модели Бака — Снеппена, характеризуется мутационным барьером B , значение которого выбирается случайным образом в интервале от 0 до 1. Вид с наимень-

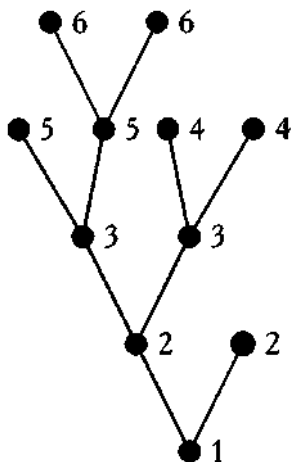


Рис. 3.18. Пример эволюционного дерева модели с увеличивающимся числом видов. Цифрами обозначен порядок, в котором образовывались узлы дерева

шим значением мутационного барьера мутирует в первую очередь, однако теперь оба вида — и новый, и старый — выживают.

Если изобразить процесс видообразования в виде рисунка, на котором каждый вид отмечен точкой и указаны связи между видами (какой вид из какого образовался), то в результате получится древообразная структура (рис. 3.18).

Для новообразовавшегося вида значение мутационного барьера B_i снова выбирается случайным образом. Можно было бы полагать, что для «старого» вида значение мутационного барьера должно оставаться неизменным (ведь в результате мутации появился новый вид, а старый вид ничуть не изменился), но тогда система никогда не достигнет своего критического состояния, как это происходило в модели Бака — Снеппена. Поэтому в рассматриваемой модели и для старого вида значение мутационного барьера также заменяется новым, выбранным случайным образом из интервала от 0 до 1.

Подобный шаг можно объяснить тем, что новообразовавшийся вид занимает ту же самую экологическую нишу, что и родительский вид, а следовательно, оба этих сосуществующих вида начинают конкурировать за пищевые ресурсы, территорию обитания и т.п. Следовательно, новообразовавшийся вид изменяет ландшафт приспособляемости старого вида, вынуждая родительский вид эволюционировать к новому локальному максимуму. Данное обстоятельство и выражается в выборе нового значения мутационного барьера для существовавшего вида. В результате вышеописанной динамики число существующих видов нарастает, что соответствует палеонтологическим данным и чего не было в модели Бака и Снеппена.

Дополнительно к процессу видообразования, точно так же как в модели Бака — Снеппена, существует и другой процесс — процесс мутаций. После того, как был найден вид с наименьшим значением мутационного барьера и значение этого барьера было изменено (возник также новый вид), значения мутационных ба-

рьеров B_i для всех видов с дистанцией k от эволюционировавшего вида изменяются, что соответствует вовлечению этих видов в эволюционный процесс. Новые значения мутационных барьеров выбираются случайным образом из интервала от 0 до 1. Дистанция между двумя wybranными видами измеряется на древовидной структуре (рис. 3.18) как число прямолинейных сегментов, которые следует провести, соединяя соседние виды так, чтобы «добраться» от одного выбранного вида до другого.

Следует заметить, что в данном случае в эволюционный процесс оказываются вовлечены действительно близкие виды, которые занимают одну и ту же экологическую нишу. Подобный вид взаимодействия более близок к реальным взаимодействиям биологических видов, наблюдаемых в природе. В то же самое время из рассмотрения оказываются исключенными взаимодействия биологических видов типа «хищник—жертва» и «хозяин—паразит», которые также встречаются в природе. В случае, если происходит эволюция, например, вида-жертвы, то, как уже отмечалось выше, это должно изменить ландшафт приспособляемости вида-хищника и заставить его также эволюционировать. Однако в данной модели этот факт никак не отражается, поскольку виды хищника и жертвы не являются соседними (и даже близлежащими на полигенном дереве, рис. 3.18).

Большинство результатов, полученных для модели с увеличивающимся числом видов, сходны с результатами, полученными для модели Бака и Снеппена. Это позволяет говорить о том, что допущения, сделанные при создании модели Баком и Снеппеном, оказались корректными. Было показано, что коэволюционные лавины существуют в модели с увеличивающимся числом видов, а распределение этих лавин для случая, когда система находится в критическом (равновесном) состоянии, также подчиняется степенному закону. Найденный показатель степени ($1,49 \pm 0,01$, (Vandewalle et al., 1995)) оказывается очень близок к верхней границе показателя модели Бака и Снеппена.

В то же время рассматриваемая модель демонстрирует некоторые интересные особенности. Оказывается, полигенное дерево имеет самоподобную структуру, фрактальная размерность (размерность Хаусдорфа) которого составляет $D_H = 1,89 \pm 0,03$ (Vandewalle et al., 1997). Как уже говорилось выше, классификационное дерево существующих на сегодняшний день биологических видов также оказывается самоподобным. Размерность же классификационных деревьев, построенных по 44 имеющимся на тот момент

каталогам существующих видов, охватывающих широкий диапазон классификационных разделов и географических регионов, лежит в диапазоне от 1,1 до 2,1 со средним значением 1,6 и доверительным интервалом 0,2 (Burlando, 1990). Подобное хорошее соответствие фрактальных размерностей может свидетельствовать о том, что механизм, положенный в основу видообразования в рассматриваемой модели, может быть действительно ответственным за процесс образования видов в природе.

В то же самое время, как нетрудно видеть, в этой модели отсутствует процесс вымирания видов: один раз возникнув, вид продолжает существовать на протяжении всего временного этапа моделирования. Поэтому дальнейшая модификация модели заключалась в том, чтобы ввести в рассмотрение вымирание. В этом случае после нахождения вида с наименьшим значением эволюционного барьера B_i случайным образом определялось, будет ли данный вид эволюционировать с образованием нового вида, или же он вымрет. Вероятность того, что рассматриваемый вид будет эволюционировать, задавалась соотношением $1 - \exp(-B_i/r)$, а вероятность того, что данный вид вымрет — соотношением $\exp(-B_i/r)$, где r — управляющий параметр. Видно, что вероятность вымирания вида уменьшается по мере того, как растет высота мутационного барьера B_i .

Одним из возможных объяснений, почему авторы модели именно таким образом определили вероятности вымирания и выживания, может быть следующее: чем выше значение локального максимума на ландшафте приспособляемости биологического вида, тем меньше вероятность того, что данный биологический вид вымрет. Понятно, что значение локального максимума ландшафта приспособляемости и величина мутационного барьера B_i — одно и то же (см. рис. 3.13), однако если ландшафт приспособляемости сильно «изрезан», максимумы чередуются с минимумами, то велика вероятность того, что у высокого пика на ландшафте приспособляемости наименьший мутационный барьер будет также высок. Тогда, чем больше высота локального максимума на ландшафте приспособляемости, тем больше значение B_i , и тем меньше вероятность у данного вида вымереть.

В случае $r = 0$ данная модель эквивалентна ранее описанной модели, в которой отсутствовали случаи вымирания. В том случае, когда значение параметра r превышает некоторое критическое r_c , составляющее для случая $k = 2$ (именно этот случай был детально исследован в (Vandewalle et al., 1997)) $0,48 \pm 0,01$, скорость вы-

мирования превышает скорость образования новых видов, и, соответственно, процесс эволюции останавливается спустя очень непродолжительное время. В тех же случаях, когда коэффициент r находится в диапазоне между нулем и r_c ($0 < r < r_c$), модель демонстрирует интересное поведение. Снова наблюдается распределение коэволюционных лавин, подчиняющееся степенному закону с показателем, близким к $3/2$, а фрактальная структура классификационного дерева напоминает родословные древа.

Теперь следует вспомнить, что реальная экосистема не является замкнутой динамической системой, а испытывает на себе воздействия, обусловленные внешними факторами. Более того, как уже обсуждалось выше, в настоящее время исследователи полагают, что массовые вымирания видов в ходе эволюционного процесса обуславливались именно внешними воздействиями. Следовательно, модель Бака и Снеппена, а также ее модификации будут незавершенными без учета внешних факторов. Поэтому необходимо рассмотреть еще одну вариацию модели Бака и Снеппена, предложенную в 1995 г. (Newman et al., 1995; Roberts et al., 1996), в которой учтено воздействие на экосистему со стороны внешнего мира.

Основной идеей, положенной в основу модели, была следующая: в результате значительных коэволюционных лавин большое число видов могло быть вовлечено в эволюционный процесс, и следовательно, после завершения лавины эти виды достигали новых локальных максимумов ландшафта приспособляемости, которые могли быть по величине меньше, чем предыдущие. Следовательно, значительная эволюционная лавина могла приводить к тому, что появлялось большое число видов с низким значением максимума ландшафта приспособляемости, которые могли затем погибнуть под действием какого-либо внешнего воздействия.

В модели зафиксировано постоянное число N биологических видов, каждый из которых характеризуется эволюционным барьером B_i (как и в модели Бака—Снеппена), а также величиной F_i , соответствующей величине приспособляемости, которую имеет данный вид, находясь в локальном максимуме ландшафта приспособляемости. Точно так же как и в модели Бака—Снеппена выбирается вид с наименьшей величиной эволюционного барьера, и для этого вида, и K соседних видов выбираются случайные величины из интервала от 0 до 1 для B_i и F_i , что соответствует процессу эволюции. Затем случайным образом выбирается положительное число η , характеризующее внешнее воздействие на экосистему в текущий момент

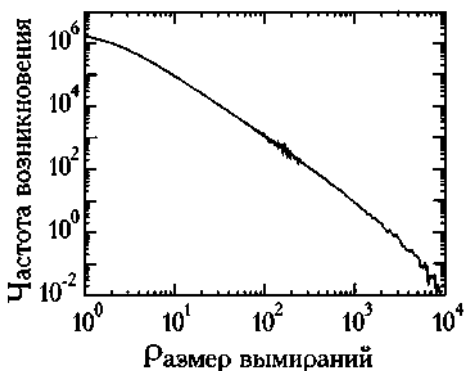


Рис. 3.19. Распределение случаев вымирания видов в модели с внешним воздействием. Число видов $N = 1000$, $K = 3$. Найденное значение степенного показателя составляет $2,02 \pm 0,03$, что находится в очень хорошем соответствии с палеонтологическими данными (Newman et al., 2003)

ми. Освободившиеся экологические ниши «заселяются» новыми видами, величины приспособляемости и эволюционных барьеров для которых выбираются также случайным образом.

Как показали проведенные исследования, распределение эволюционных лавин также подчиняется степенному закону с показателем, равным примерно $3/2$, в то время как распределение вымираний биологических видов (как следует из самой модели, теперь эти два процесса — эволюция к новому локальному максимуму ландшафта приспособленности и вымирания — оказываются разделенными) подчиняется степенному закону с показателем $2,02 \pm 0,03$ (рис. 3.19), что очень хорошо соответствует палеонтологическим данным.

В то же самое время описанная модель также имеет ряд недостатков. Во-первых, модель Бака и Снеппена (от которой унаследована рассматриваемая модель) предполагает, что каждый шаг дискретного времени имеет различную длительность во времени «реальном». Следовательно, вероятность того, что во время более длительного периода (в «реальном» времени) произойдет значительное внешнее воздействие на экосистему, должна быть выше, чего на самом деле в модели не рассматривается. Во-вторых, как показали дальнейшие исследования, межвидовое взаимодействие в модели не играет существенной роли. Несколько позднее была предложена модель, которая была начисто лишена внутренних взаимодействий между видами и демонстрировала аналогичные результаты.

Эту модель, предложенную Ньюманом (Newman et al., 1996; Newman, 1997), можно рассматривать как упрощенный вариант только что описанной модели. Постоянное число видов (N штук) в модели не взаимодействуют друг с другом. Безусловно, в реаль-

дискретного времени, и все виды, для которых $F_i < \eta$ считаются вымершими.

ной экосистеме биологические виды взаимодействуют друг с другом, однако столь радикально упрощенный вариант модели также дает очень неплохое соответствие палеонтологическим данным. Следствием этого может быть вывод о том, что если вымирания биологических видов обусловлены внешними воздействиями, то межвидовое взаимодействие не играет существенной роли в эволюционном процессе.

Для каждого биологического вида существует порог переносимости внешнего воздействия x_i . Внешнее воздействие на экосистему описывается величиной стресса η , которая на каждой итерации выбирается случайным образом и которая подчиняется некоторому распределению $p_{\text{stress}}(\eta)$. На каждом временном шаге все виды, порог переносимости которых оказывается меньше, чем величина внешнего воздействия ($x_i < \eta$), вымирают; остальные виды, порог переносимости которых оказывается выше величины воздействия, выживают. Таким образом, значительное внешнее воздействие, такое как изменение уровня моря, столкновение с метеоритом, может вызвать массовое вымирание видов, в то время как менее серьезные внешние воздействия являются причиной «фоновых», более малочисленных, вымираний. Следует обратить внимание, что в этой модели одновременное массовое вымирание видов обусловлено тем, что одно и то же значительное внешнее воздействие влияет на все виды; в этом случае (имеется в виду — в данной модели) нет коэволюционных лавин, когда эволюция одного вида вызывает эффект домино, вовлекая в эволюцию другие виды.

Опустевшие в результате вымираний экологические ниши «заселяются» на каждом шагу новыми видами, число новых видов равно числу вымерших. Порог вымирания (переносимости) x_i для этих видов может либо наследоваться от существующих видов, возможно, с небольшими случайными модификациями, либо выбираться случайным образом из распределения $p_{\text{thresh}}(x)$. Оказывается, что для большого числа видов N результаты не зависят от того, каким именно из двух описанных способов осуществляется заполнение пустующих экологических ниш; в (Newman, 1996; Newman, 1997) значение порога переносимости выбиралось случайным образом из интервала от 0 до 1. Распределение случайной величины полагалось равномерным в этом диапазоне. Понятно, что влияние на динамику системы выбранных случайным образом пороговых величин сохраняется лишь до первого значительного вымирания, которое рано или поздно происходит как в модели, так и в экосистеме.

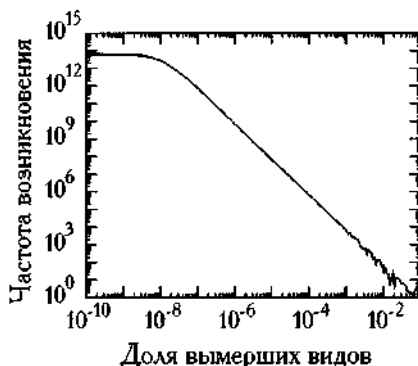
Понятно, что те виды, величина порога выживаемости которых оказалась (случайным образом) достаточно велика, благополучно «переживают» большинство внешних воздействий, за исключением самых значительных, в то время как виды с низким порогом выбывают из рассмотрения и заменяются новыми, пороги переносимости которых могут быть с равной вероятностью как большими, так и малыми. Доля видов с большими величинами порогов переносимости x_i будет возрастать, а с малыми порогами — уменьшаться, и если не допускать эволюционного изменения пороговых величин x_i , то после более или менее длительного периода подавляющее число видов будет иметь высокий порог выживаемости, будет образовываться своего рода «окно» по параметру x_i , в котором будет представлено очень малое число видов, как это происходит в модели Бака и Снеппена. Как следствие этого размер вымираний видов уменьшается, и в конце концов вымирания прекращаются почти полностью, чего, как известно, не наблюдается в реальных экосистемах.

Чтобы избежать этого, полагается, что между вымираниями виды могут эволюционировать, в результате чего величина их порога переносимости может как увеличиваться, так и уменьшаться. Математически возможно слегка изменять случайным образом величины x_i у всех видов, либо выбирая (опять-таки случайно) долю f из N видов, изменять их пороговые величины кардинально, заново выбирая случайным образом величины x_i , оставляя пороговые величины для остальных видов без изменений. Как показали дальнейшие исследования, практически все равно, какой из способов выбирать. В (Newman, 1996; Newman, 1997) использовался второй способ, когда у малой доли f видов изменялись случайным образом пороговые величины на новые значения.

Выбор распределения $p_{\text{stress}}(\eta)$ случайной величины η вызывает некоторые затруднения, поскольку неизвестно, каков вид распределения внешних воздействий в природе. Для некоторых видов воздействий, например падения метеоритов, существуют достаточно хорошие «экспериментальные» результаты (т.е. результаты наблюдений), однако в подавляющем большинстве случаев наших знаний о характере распределения внешних воздействий на экосистему оказывается недостаточно. Одним из возможных выходов из сложившейся ситуации является исследование построенной модели с разными видами распределения $p_{\text{stress}}(\eta)$ случайной величины η .

Рис. 3.20. Распределение размеров вымираний видов в модели Ньюмана. Распределение подчиняется степенному закону с показателем степени $2,02 \pm 0,02$, за исключением случаев вымираний малых размеров

На рис. 3.20 показаны результаты исследования модели Ньюмана для случая, когда внешнее воздействие подчиняется распределению Гаусса

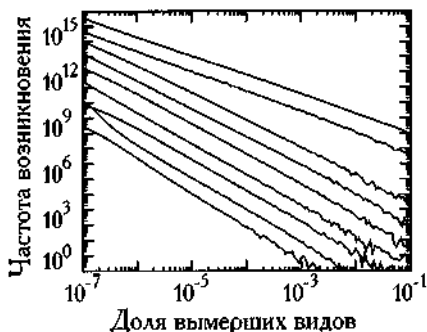


$$p_{stress}(\eta) = \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3.8)$$

По всей видимости, данный тип случайных воздействий является одним из наиболее часто встречающихся в природе. Из рис. 3.20 видно, что распределение случаев вымирания видов по масштабам хорошо соответствует степенному закону с показателем степени $2,02 \pm 0,02$, что находится в хорошем соответствии со значением $2,0 \pm 0,2$, полученным из анализа палеонтологических данных. В то же самое время видно, что для малых вымираний (доля вымерших видов менее чем 10^{-8}) наблюдается отклонение от степенного закона — распределение выходит на горизонтальную «полочку», положение которой определяется величиной управляющего параметра f (сравните с рис. 3.5, 3.6).

В ходе проведенных исследований выяснилось также, что для достаточно широкого круга распределений $p_{stress}(\eta)$ случайной величины η распределение вымирания видов подчиняется все тому же степенному закону (рис. 3.21). Соответствующий показатель может слегка изменяться, но

Рис. 3.21. Распределение случаев вымирания видов по масштабам для различных видов распределений (распределение Гаусса, Лоренца, Пуассона, экспоненциальное и ряда других). В каждом из рассматриваемых случаев распределение вымираний подчиняется степенному закону с показателем степени, близким к 2 (Newman et al., 2003)



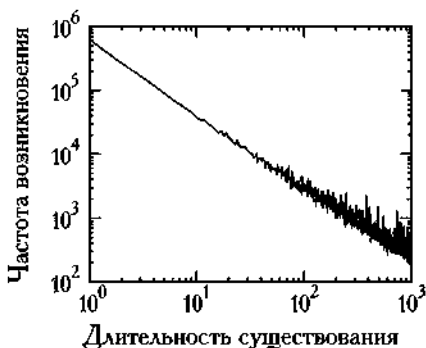


Рис. 3.22. Распределение длительностей существования видов, подчиняющееся степенному закону с показателем степени, близким к единице (Newman et al., 2003)

оказывается близок к 2. Таким образом, предложенная модель работоспособна практически для всех наиболее часто встречающихся распределений случайных величин.

Еще одна возможная характеристика — распределение длительностей существования видов — также может быть измерена в ходе численного моделирования вышеописанной модели. Результаты исследований показывают, что подобное распределение также подчиняется степенному закону (см. рис. 3.22), показатель степени которого составляет $1,05 \pm 0,05$, что отличается от показателя степени распределения длительностей существования биологических видов, известных из палеонтологии.

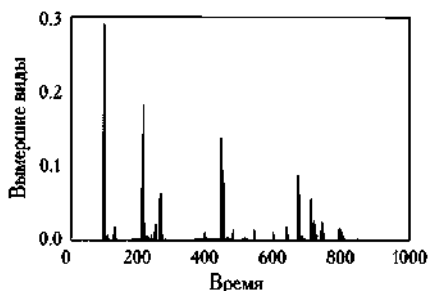
В ходе анализа динамики системы была выявлена интересная особенность: последовательность более мелких по своим масштабам случаев вымирания видов после очень крупных вымираний (рис. 3.23). Объяснение этому явлению достаточно простое: после крупных случаев вымирания видов экологические ниши заполняются большим числом новых видов, при этом велика доля видов с низким значением порога переносимости, которые обычно в процессе эволюции «удаляются» слабыми внешними возмущениями. Вследствие этого возрастает вероятность новых, более слабых вымираний. Данная особенность отличает модель Ньюмана от всех, описанных ранее. Если бы подобный эффект можно было обнаружить на основе анализа палеонтологических данных, то это был бы серьезный аргумент в пользу гипотезы о том, что все вымирания обусловлены исключительно внешними воздействиями. К сожалению, в настоящее время ничего подобного в реальных данных не наблюдается, и, более того, непонятно, являются ли данные, известные в настоящее время исследователям, достаточно полными для того, чтобы подобное явление было в них отражено каким-либо образом.

В заключение отметим, что существуют различные разновидности описанной модели, в частности, в (Wilke et al., 1997) предложена сходная модель, в которой число существующих видов

Рис. 3.23. Динамика модели Ньюмана с течением времени. Отчетливо видна последовательность мелких случаев вымирания видов после значительных (Newman et al., 1996)

N не остается постоянным, а увеличивается с течением времени, подчиняясь логистическому уравнению

$$\frac{dN}{dt} = gN \left(1 - \frac{N}{N_{\max}} \right), \quad (3.9)$$



где g и $N_{\max}$ — управляющие параметры системы. В случае, если $g = 0$, как нетрудно видеть, получается уже рассмотренная модель с фиксированным числом видов. Оказывается, динамика данной системы зависит от параметра g следующим образом: если g оказывается меньше некоторого критического уровня g_c ($g < g_c$), то число видов в модели уменьшается, и в конце концов «жизнь» прекращается. В критическом состоянии ($g = g_c$) скорость возникновения новых видов оказывается равной скорости вымирания, а при $g > g_c$ наблюдается динамика системы, весьма схожая с той, которую демонстрирует модель Ньюмана. Показатель степени в степенном законе, описывающем распределение случаев вымирания видов, слегка уменьшается с увеличением параметра g , однако остается близок к 2.

Как следует из модели, предложенной Ньюманом, вполне можно объяснить и массовые, и фоновые вымирания биологических видов исключительно внешними стрессами, внешними воздействиями на экосистему со стороны окружающего мира, не учитывая межвидовых взаимодействий. Учет внешних воздействий в модели Бака—Снеппена предполагает подобное воздействие, но несколько «неявным» образом: близкие виды оказываются вовлеченными в процесс эволюции. Ясно, однако, что понятие «близкого» вида весьма расплывчато, а в модели Бака—Снеппена это никак не конкретизируется. Совершенно очевидно, что один вид на другой может действовать угнетающе (например, действие хищника на жертву, конкуренция видов за общую экологическую нишу) или, наоборот, поддерживать существование другого вида (например, действие жертвы на хищника), такое действие может быть симметричным (различные случаи симбиозного существо-

вания) или, наоборот, асимметричным (действие хозяина на паразита и паразита на хозяина).

Все это разнообразие аспектов не учитывалось в модели Бака и Снеппена, но вполне вероятно, что эти факторы также могут иметь влияние на эволюционные процессы: гибель одного биологического вида вполне может повлечь за собой вымирание другого, результатом чего может явиться массовое вымирание видов с последующим замещением опустевших экологических ниш — возникнет эволюционная лавина. Для построения подобной модели, учитывающей межвидовое взаимодействие, фактически нет необходимости привлекать понятия ландшафта приспособляемости, эволюционного барьера, порога выживаемости для каждого отдельного вида.

Причина, заставляющая тот или иной вид исчезнуть из рассмотрения, кроется в исчезновении других видов, взаимодействующих с рассматриваемым. Для того чтобы модель эволюционировала с течением времени, конечно, необходимы некоторые флуктуации, однако они могут быть введены на уровне коэффициентов взаимодействия видов друг с другом, без определения параметров внешних воздействий на экосистему, в отличие, например, от модели Ньюмана.

В моделях межвидового взаимодействия важную роль играют следующие факторы: выбор «топологии» связей между видами (любой вид может взаимодействовать либо с каждым из оставшихся, либо только с некоторыми), выбор механизма «заселения» опустевших в результате вымираний биологических ниш, определение того, будет ли число видов в модели постоянным или изменяющимся.

Одной из моделей, пытающихся объяснить эволюционный процесс Земли, основываясь на межвидовом взаимодействии, является модель, предложенная Соле и Манрубия (Solé & Manrubia) в 1996 г. (Solé et al., 1996; Solé et al., 1996a; Solé R.V., 1996). Для описания воздействия видов друг на друга используется матрица взаимодействия J , коэффициенты которой J_{ij} описывают воздействие i -ого вида на j -ый. Соответственно коэффициент J_{ji} матрицы характеризует действие j -ого вида на i -ый. Положительное значение коэффициента J_i означает, что i -ый вид оказывает поддерживающее, благоприятное воздействие на j -ый, в то время как отрицательное значение, наоборот, говорит о том, что i -ый вид угнетает, препятствует существованию j -ого вида. Величины коэффициентов J_{ij} в модели лежат в диапазоне от -1 до $+1$ и перво-

начально выбираются случайным образом. Предполагается, что каждый вид взаимодействует с каждым, иными словами, среди коэффициентов J_{ij} нет нулевых, хотя, конечно, некоторые из них могут быть очень маленькими по абсолютной величине. В то же самое время вполне можно сконструировать модель так, чтобы каждый вид взаимодействовал не со всеми, а лишь с некоторыми, для чего следует положить коэффициенты матрицы взаимодействия, соответствующие оставшимся видам, равными 0. Полное число видов в модели остается неизменным.

Вид i вымирает, если суммарное воздействие (а оно может быть как положительным, так и отрицательным) на него со стороны всех остальных видов

$$W_i = \sum_j J_{ji} \quad (3.10)$$

оказывается меньше некоторого порогового значения θ . Суммирование необходимо проводить по тем видам, которые не вымерли. (В том случае, если вид j не оказывает воздействия на рассматриваемый i -ый вид, соответствующий коэффициент J_{ji} равняется нулю.) Для того, чтобы различать, существует ли в рассматриваемый момент времени i -ый вид, в рассмотрение вводится величина $S_i(t)$, равная 1, если вид существует, и 0, если он вымер. В этом случае динамика системы определяется соотношением

$$S_i(t+1) = \sigma \left(\sum_j J_{ji} S_j(t) - \theta \right), \quad (3.11)$$

где $\sigma(x)$ является функцией Хевисайда, время, разумеется, полагается дискретным.

Теперь необходимо дополнить модель еще двумя «механизмами»: один из них должен обеспечивать внесение малых возмущений в систему, другой — заполнять образовавшиеся вакантные экологические ниши новыми видами. Возмущения, не позволяющие системе «застыть» в неизменном состоянии, вносятся следующим образом: на каждом дискретном шаге по времени для каждого вида i случайным образом изменяется один из элементов J_{ji} , обеспечивающих взаимодействие с другими видами. Новые значения элементов матрицы взаимодействия J выбираются случайным образом из интервала от -1 до $+1$. Подобные возмущения могут привести к вымиранию одного или нескольких видов,

поскольку вид может «лишиться» поддерживающего влияния другого вида или, наоборот, на него может быть оказано подавляющее действие. Подобные изменения коэффициентов матрицы взаимодействия могут быть обусловлены как внутрисистемными факторами, так и внешним действием на экосистему со стороны окружающего мира.

Заполнение пустующих экологических ниш, образовавшихся вследствие вымирания видов, заполняются следующим образом: произвольно из существующих выбирается необходимое количество видов, и этими видами заполняются пустые ниши экосистемы. Соответственно «копируются» и все их коэффициенты взаимосвязей с существующими видами. При этом добавляется малый шум η (соответствующие значения выбираются случайным образом из равномерного распределения в интервале $(-\xi, \xi)$). Иными словами, если k -ый вид заполняет пустующую нишу i -ого вида, то

$$J_{ij} = J_{kj} + \eta_{kj}, J_{ji} = J_{jk} + \eta_{jk}, \quad (3.12)$$

где j пробегает по всем номерам видов, с которыми взаимодействует i -ый вид.

В основном исследовании проводились с моделью, в которой было от 100 до 150 видов; пороговое значение, при котором происходило вымирание вида, равнялось 0 ($\theta = 0$), величина ξ равнялась 0,01. Начальное распределение коэффициентов матрицы взаимодействия J выбиралось случайным образом, однако наблюдение за динамикой системы и выборка соответствующих данных осуществлялись лишь после того, как был выбран переходной процесс, длительность которого составляла 10 000 шагов дискретного времени. Как выяснилось в результате проведенного исследования, размеры s вымираний видов варьировались в очень широких пределах: так, наблюдались вымирания, в результате которых погибало более 90% всех видов. Такие массовые вымирания происходили в системе после длительного периода малой активности.

Распределение размеров вымираний $p(s)$ подчиняется степенному закону с показателем степени $\alpha = 2,3 \pm 0,1$ (см. рис. 3.24) Несколько позднее подобные исследования, в которых значение управляющего параметра ξ было выбрано равным 0,05, дало показатель степени $\alpha = 2,05 \pm 0,06$, что находится в хорошем соответствии с показателем $\alpha = 2,0 \pm 0,2$, согласующимся с палеонтологическими данными. Распределение длительностей интервалов времени с малой активностью (т.е. таких интервалов, в которых не

Рис. 3.24. Распределение размеров вымираний в модели Соле и Манру-
биа с числом видов $N = 150$

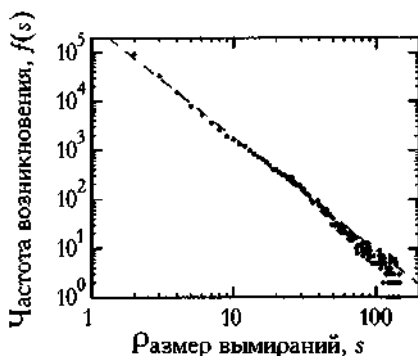
происходило значительных случаев вымираний) также подчиняется степенному закону, показатель которого составляет $3,0 \pm 0,1$.

Виды, которые были «скопированы» с существующих для того чтобы заполнить пустующие экологические ниши, образовавшиеся в результате вымираний, могут рассматриваться как родственные со своими «родителями» (с которых были сделаны «копии»), имеющие одного общего предка. В этом случае становится возможным построить дерево видов и измерить его размерность, которая получилась близкой к двойке, что согласуется с результатами (Vandewalle, 1997) и данными, полученными для существующих сегодня видов.

Следует обратить внимание еще на один интересный аспект: если в рассматриваемой модели выбрать значение θ не нулевым, а достаточно сильно отличающимся от нуля, то распределения размеров вымираний и длительностей интервалов времени с малой активностью будут подчиняться не степенному, а экспоненциальному закону. Следовательно, если вымирания видов определяются межвидовым взаимодействием, то остается открытым вопрос, почему природа именно таким образом «выбрала» пороговое значение θ , при котором вид вымирает, чтобы соответствующие распределения подчинялись степенному, а не экспоненциальному закону.

Тип связей «каждый с каждым», реализованный для описания межвидового взаимодействия в модели Соле и Манрубиа, является глобальным и всеобъемлющим. В то же время в реальных экосистемах очень важную роль играют взаимодействия видов, основанные на пищевых цепочках, определяющих, грубо говоря, кто кем питается. Безусловно, данный тип взаимодействия является не единственным, но весьма важным. Интересно рассмотреть модели, описывающие эволюционную динамику, в основу которых положен именно данный тип взаимодействия видов.

Подобная модель была предложена в 1998 г. (Amaral et al., 1999) Амаралом и Мейером. В модели существуют L трофических уров-



ней, обозначаемые как $l = 0, 1, \dots, L - 1$. Каждый трофический уровень имеет N экологических ниш, каждая из которых может быть занятой одним видом или же оставаться пустой. Каждый вид трофического уровня l (за исключением нулевого уровня) питается особями k видов с низлежащего трофического уровня $l - 1$. Если все k видов, принадлежащих $(l - 1)$ -ому трофическому уровню и служащих пищей виду на трофическом уровне l , вымирают, то вымирает и рассматриваемый вид с уровня l , в результате чего может возникнуть лавина вымирания видов. Процесс вымирания видов инициируется следующим образом: на каждом дискретном шаге случайно выбранный вид нулевого трофического уровня с вероятностью p переводится в разряд «вымерших» (а, соответственно, с вероятностью $(1 - p)$ остается существовать дальше). Подобное вымирание может быть обусловлено, например, воздействием на экосистему со стороны окружающего мира.

Процесс вымирания видов должен компенсироваться процессом видообразования: с интенсивностью μ каждый существующий вид трофического уровня l «пытается породить» вид-потомок. Для этого случайным образом выбирается одна из экологических ниш на трофическом уровне l или на соседних трофических уровнях $(l - 1)$ или $(l + 1)$. В том случае, если эта случайным образом выбранная экологическая ниша оказывается пустующей, то в нее «помещается» новый вид, для которого случайным образом выбираются k видов-жертв с нижнего трофического уровня. Величина управляющего параметра μ должна быть достаточно велика, чтобы средняя скорость видообразования превышала скорость вымирания, в противном случае все существующие виды вымрут и процесс эволюции на этом закончится. Следует отметить, однако, что процесс видообразования более длительный, чем вымирание, в рассматриваемой же модели (и в некоторых других, рассмотренных выше) длительности этих процессов одинаковы. Поэтому появление новых видов в данной модели разумно объяснять не видообразованием, а проникновением существующих видов в пустующие экологические ниши.

Начальная эволюция системы начинается с того, что на нулевой трофический уровень случайным образом помещается начальное число видов $N_0 < N$. В том случае, если скорость возникновения новых видов достаточно велика, число существующих видов начинает расти экспоненциально до тех пор, пока не начнет сказываться ограничение со стороны пустых экологических ниш.

Динамика данной системы исследовалась для случая шести трофических уровней ($L = 6$), остальные параметры были выбраны следующими: $k = 3$, $N = 1000$, $N_0 = 50$, $p = 0,01$, $\mu = 0,02$. Распределение размеров вымираний подчиняется степенному закону с показателем степени $\alpha = 1,97 \pm 0,05$, а временная реализация системы оказывается сильно неравномерной: фазы малой активности прерываются случаями вымираний, среди которых встречаются очень значительные. Динамика возникновения новых видов оказывается тесно связанной с процессами вымираний. Позднее подобные результаты были получены для более высоких значений параметра k .

3.4. Об одной компьютерной модели биологической эволюции

Рассмотрение большого числа моделей, имеющих своей задачей описать на качественном (а в чем-то и количественном) уровне глобальные эволюционные процессы, может несколько озадачить читателя: каждая из моделей базируется на разумных предположениях; результаты, полученные при исследовании каждой из вышеописанных моделей, находятся в хорошем соответствии с палеонтологическими данными, но все модели сами по себе очень разные. Невольно возникает вопрос, какая же модель справедлива. К сожалению (а может быть, к счастью?) дать ответ на этот вопрос пока не представляется возможным: процесс изучения глобальных эволюционных закономерностей находится сейчас только лишь в начальной стадии. Вполне возможно, что каждая из моделей в чем-то по-своему правильно отражает те события, которые происходили на нашей планете в течение долгих миллионов лет эволюции. Как бы то ни было, ответ на поставленные вопросы, касающиеся глобальных эволюционных процессов, могут дать только время и дальнейшие научные исследования в этом направлении, которые в настоящий момент проводятся весьма интенсивно.

Большой прогресс в этом направлении связан и со значительным проникновением в научные исследования компьютеров. Многие исследования из тех, которые были описаны выше, просто были невозможны несколько десятилетий назад по причине отсутствия мощных вычислительных средств. В то же самое время не следует считать компьютер исключительно «счетным» средством, облегчающим исследователям проведение различных

выкладок. Именно с компьютерами связано новое направление в исследовании эволюционных процессов, называемое Artificial Life (AL) — искусственная жизнь. В основе этого направления лежит чрезвычайно смелая (наверное, можно даже сказать, дерзкая) идея перенести эволюционные процессы в другую, неуглеродную среду. Подобной средой может стать оперативная память компьютера, в которой, как показывают исследования, возможно существование самой настоящей искусственной жизни.

Понятно, что сочетание слов «настоящая искусственная жизнь» звучит странно (и непривычно), но давайте задумаемся над вопросами: что такое жизнь, какой объект можно считать живым? Оказывается, что при всей привычности понятия «жизнь» дать строгое исчерпывающее определение не так-то просто. Все наши представления о жизни основываются на нашем повседневном опыте и в конечном счете исчерпываются одним объектом — планетой Земля с существующей на ней жизнью. Вопрос о том, возможна ли жизнь на других планетах, и если да, то каковы могут быть формы инопланетной жизни, на сегодняшний день остается открытым. Известно, что в основе жизни на нашей планете лежит химический элемент углерод. Тогда возникает еще один вопрос — возможно ли существование жизни в других (неуглеродных) средах, и если да, то каковы будут формы этой жизни и каким закономерностям будет подчиняться глобальный эволюционный процесс в этих средах?

Может показаться, что данные вопросы во многом умозрительны и искусственны, а следовательно, дать на подобные вопросы обоснованный ответ практически невозможно. Тем не менее, существует относительно новое направление в науке, называемое Artificial Life (искусственная жизнь), которое может в некоторой степени пролить свет на вышеприведенные вопросы. Наверное, на сегодняшний день трудно сказать, что получится в итоге на этом сложном пути, к какой области естествознания примкнет Artificial Life — к биологии, математике, кибернетике, синергетике, нелинейной динамике, глобалистике, вырастет ли в самостоятельную науку или останется забавной игрушкой, но, тем не менее, AL сегодня бурно развивается (об этом свидетельствует огромное число научных статей по данной тематике) и заслуживает хотя бы краткого упоминания. В своем повествовании будем придерживаться идеологии работы (Ray, 1994).

Понятно, что прежде всего следует оговорить, что понимать под словом «жизнь», какой объект следует считать живым, а ка-

кой нет. Одним из возможных подходов является определение списка качеств или свойств, которыми должен обладать живой объект. Наиболее общими такими свойствами являются способности размножаться, развиваться, реагировать на внешние раздражения, в той или иной степени «восстанавливаться» после повреждений. Если рассматриваемый объект обладает всеми этими свойствами, то он может быть причислен к живым организмам. И хотя вышеприведенный список оказывается весьма коротким, почти все примеры искусственной жизни не попадут в категорию живых существ.

Возможен несколько иной подход: определение списка свойств, которые характерны только для живых существ. И если рассматриваемый объект обладает хотя бы одним из подобных свойств, то он может считаться в некотором смысле живым. Может быть, имеет смысл задавать вопрос не о том, является ли некоторый объект живым (на него весьма трудно ответить!), а вопрос, демонстрирует ли этот объект свойства, присущие живым существам. Многие работы, лежащие в области AI, затрагивают отдельные аспекты жизни (например, способность эволюционировать и расти, интеллект, язык, социальное поведение и т.п.). В этом случае автор создает искусственную систему, которая демонстрирует свойства, присущие живым объектам, интересующие автора. В то же самое время эта система может не демонстрировать никаких других свойств, присущих живым существам. При этом следует отметить, что искусственные системы, демонстрирующие некоторые свойства живых объектов, могут быть самой различной природы (например, (de Garis et al., 1993; Hong, 1992)).

Жизнь, существующая на Земле, может рассматриваться как результат естественного отбора в углеродной среде. В то же самое время процесс глобальной эволюции (по крайней мере, теоретически) может протекать как на других планетах, так и в совершенно других средах, например, в цифровой среде, связанной с компьютером. Речь не идет о моделировании каких-либо процессов биологических объектов, реально существующих в нашем мире, с помощью электронных вычислительных машин. Компьютер выступает в этом случае не как средство моделирования, а скорее как среда обитания, в которой могут существовать «цифровые организмы», живущие и эволюционирующие по другим законам цифрового мира.

Подобный подход может существенно расширить наши представления о жизни и оказаться мощным средством для решения

отдельных биологических задач. «Цифровая жизнь» обладает рядом уникальных свойств, которые делают ее изучение проще, нежели изучение жизни биологической. Выявленные закономерности, если они носят всеобщий характер, могут быть использованы в биологии. Почему же «цифровую жизнь» изучать легче? По ряду причин: во-первых, поскольку «цифровые организмы» обитают внутри компьютера, гораздо проще получать данные об их существовании. Во-вторых, любые подобные данные можно получать без всякого воздействия на среду обитания, что практически невозможно в биологии. Кроме этого, «цифровой жизнью» гораздо легче манипулировать, и если необходимо, процесс эволюции может быть повторен в точности (например, для получения каких-либо данных, которые не были получены при оригинальном эволюционном процессе). Наконец, многие жизненные процессы (например, эволюционные) в цифровой среде протекают значительно быстрее, нежели в биологических системах. Но следует помнить, что законы окружающего мира для биологических и «цифровых» систем совершенно различны — если биологические системы развиваются под влиянием законов физики, химии и т.п., то «цифровые» организмы живут по законам, определяемым прежде всего архитектурой компьютера, внутри которого они существуют.

Возможных способов создания «цифровой» жизни на сегодняшний день известно много (например, (Hillis, 1991; Yaeger, 1994; Koza, 1992)), но мы остановимся на одной из систем, известной под названием Tierra (Ray, 1994; Ray, 1991). В этой системе реализуется основной сценарий Ч. Дарвина: самовоспроизводящиеся существа с наследуемыми генетическими изменениями, существующие в ограниченной среде, моделируемой компьютером.

Роль живых существ играют исполняемые программные коды, которые могут копировать себя в оперативную память компьютера. Фактически они играют роль генетического кода в органической жизни. Копирование (размножение) «существ» осуществляется благодаря выполнению программ центральным процессором компьютера. Таким образом, время, затрачиваемое процессором на выполнение отдельной программы, играет роль энергии, которая управляет процессами обмена веществ.

Поскольку программы занимают место в оперативной памяти компьютера, то «пространство оперативной памяти» играет роль физического пространства, ареала проживания (экологической ниши). Каждая программа имеет исключительное право «записы-

вать» информацию в те блоки памяти, которыми она «владеет». В то же самое время любая программа и любой процесс может «считывать» (и исполнять) любые машинные коды, распределенные в оперативной памяти. По мнению автора Tierra (Ray, 1994), это является аналогом полупропускающей мембраны органической клетки, частично защищающей процессы, протекающие внутри клетки, от внешних воздействий.

Существуют и «мутации» («генетические изменения») — случайные изменения отдельных битов в программном коде. Дополнительные изменения в «программном коде существ» могут также происходить за счет ошибок, которые время от времени совершает центральный процессор. Эти ошибки не являются генетическими изменениями, но они могут явиться причиной подобных изменений. По мере «размножения» программ в оперативной памяти компьютера свободного места для вновь порождаемых программ остается все меньше, и тогда оперативная система начинает уничтожать самые старые программы, находящиеся в оперативной памяти, с тем, чтобы расчистить место для следующих поколений.

Начинается же процесс эволюции с прародителя — программно-го кода, занимающего в оперативной памяти компьютера 80 байт. Программа с помощью операционной системы «исследует» себя, чтобы определить свой размер и расположение в оперативной памяти, затем (опять-таки с помощью операционной системы) она выделяет свободное место в оперативной памяти для своего потомка, после чего происходит копирование байта за байтом программного кода родителя в выделенное место оперативной памяти. Этот процесс означает рождение нового «существа», которое с этого момента рассматривается как независимый объект с такими же правами, что и программа-родитель.

Таким образом, в вышеописанной системе реализуется (в той или иной степени) сценарий Чарльза Дарвина: простейшие существа, способные к самовоспроизводству, конкурируют друг с другом за «место под солнцем». Аналогичная (трудно сказать, что похожая — именно аналогичная) ситуация, по-видимому, имела когда-то место на Земле. Следовательно, наблюдение за развитием подобной системы может оказаться не только интересным занятием, но и полезным; с помощью подобной системы Tierra могут быть найдены ответы на вопросы об эволюционном развитии биологической жизни на Земле (если биологическая и синтетическая, в данном случае цифровая, жизнь подчиняются некоторым общим закономерностям).

При практической реализации Тiегга возникли сложности технического характера — обычные компьютеры, получающие все большее и большее распространение, не удовлетворяют вышеописанным требованиям. Во-первых, корректно работающие компьютеры не совершают ошибок в вычислениях, отсутствуют и случайные изменения битов (а именно эти изменения, в общем-то, и лежат в основе замысла авторов Тiегга). Если же компьютерам разрешить делать вышеназванные ошибки, то накапливающиеся случайные изменения очень быстро приведут к краху операционной системы. Во-вторых, операционные системы современных компьютеров могут порождать дополнительные (дочерние) процессы, но уничтожение процессов осуществляется по другим критериям, нежели их «возраст».

Предположим, однако, что названные трудности были преодолены на современном обычном компьютере и удалось «запустить» процесс эволюции. В случае (довольно маловероятном), если в памяти компьютера возникнет жизнеспособный вид цифровой жизни, существует опасность того, что из-за небрежности или по каким-либо другим причинам «цифровые микроорганизмы» могут быть занесены на другой компьютер, а следовательно, существует опасность их бесконтрольного распространения и развития на других компьютерах (по крайней мере, такого же типа, как и первоначальный компьютер, на котором начинался эволюционный процесс) подобно компьютерным вирусам.

Следует сделать одно небольшое отступление — компьютерные вирусы, о которых, наверное, наслышано большинство людей, отличаются от описываемых форм «цифровой жизни». Компьютерные вирусы — это программы, которые могут исполняться на современных компьютерах. Они написаны программистами с той или иной целью и обладают способностью самовоспроизводиться. В то же время, насколько нам известно на данный момент, они не могут «мутировать» и, соответственно, эволюционировать. Именно по известному виду компьютерных вирусов можно осуществлять борьбу с ними. Именно на этом принципе (поиск известных фрагментов компьютерного кода) осуществляется работа антивирусных программ. По всей видимости, день, когда появятся компьютерные вирусы, способные к видоизменениям, конкуренции и естественному отбору, начнет новую эру (несколько более печальную) в истории использования компьютеров. Остается надеяться, что это произойдет не скоро.

Таким образом, из всего вышеизложенного следует, что необходимо создать специальный компьютер, работающий по иным принципам, нежели обычные компьютеры, для исследования эволюции «цифровой жизни». Однако существует и другая возможность, которая и была реализована авторами Тиегга: ими был создан «виртуальный компьютер» — программа, которая может быть запущена на любом современном компьютере и которая моделирует (может быть, лучше сказать, симулирует) работу компьютера, удовлетворяющего эволюционным требованиям. Цифровая жизнь и эволюция возможна только «внутри» виртуального компьютера. Вне виртуального компьютера «цифровые организмы» существовать не могут — они представляют собой просто набор данных, которые также способны к самовоспроизводству, как и текстовые файлы, созданные каким-либо текстовым редактором.

Остановимся теперь на видах цифровых организмов, появившихся в ходе эволюционного развития в системе Тиегга. Оказывается, что одной из первых открытых форм экологической адаптации при исследовании эволюционного процесса цифровой жизни был паразитизм. Цифровой организм избавлялся почти от половины своего собственного кода (соответственно почти в два раза уменьшаясь в размерах) за счет исполнения при размножении части похожего кода, который принадлежал цифровому существу другого вида («хозяину»). Понятно, что «паразит» мог почти в два раза быстрее воспроизводиться, нежели «хозяин», поскольку ему нужно было воспроизвести половину кода. В то же самое время паразиты не могли полностью вытеснить цифровой вид своих «хозяев», поскольку они существенным образом зависели от информации, содержащейся в коде своих «хозяев». Вследствие этого в ходе эволюционного развития могли возникать колебания численностей хозяев и паразитов с течением времени, подобные циклам Лотки—Вольтерра, рассмотренным нами ранее. Более того, поскольку хозяева также эволюционировали, то в ходе эволюционного развития им иногда удавалось выработать иммунитет от паразитов и освободиться от них. Вид защиты мог заключаться, например, в незначительной модификации структуры кода, в результате чего паразиты уже не могли использовать код хозяев для собственного размножения. Но и паразиты в ходе эволюционного развития могли «подобрать ключи» к средствам защиты бывших хозяев и вновь к ним вернуться.

Следующей удивительной формой экологической адаптации цифровых организмов является так называемый гиперпарази-

тизм. В результате мутаций у некоторых хозяев вырабатывается способность «перехватывать» часть своего кода, воспроизводимого паразитом. Ситуация очень похожа на упоминаемую в русской поговорке «Вор у вора дубинку украл». В то время, как паразит воспроизводит необходимую ему часть кода «хозяина», «хозяин», оказывающийся гиперпаразитом, перехватывает воспроизведенный фрагмент кода, достраивая к нему оставшуюся часть с тем, чтобы «породить» дочерний организм. Естественно, организму-паразиту не удастся в таком случае воспроизвести дочерний организм, а следовательно, паразиты могут очень быстро вымереть, если не сумеют приспособиться к новым условиям существования.

Помимо отношений «хозяин—паразит» могут проявляться и кооперативные (совместные) механизмы развития. Оказывается, эти механизмы могут проявляться в том случае, когда цифровые организмы какого-либо одного типа полностью доминируют в оперативной памяти компьютера. Такое может случиться, например, когда гиперпаразиты полностью вытесняют тип паразитов. В этом случае гиперпаразиты не могут далее существовать, поскольку их механизм самовоспроизводства был ориентирован на «захват» частей кода, воспроизводимого отсутствующими теперь паразитами. Однако в результате мутаций могут появиться видоизмененные организмы, которые хотя и не способны породить дочерний организм в изоляции, но совместно друг с другом, когда их в памяти несколько, они могут воспроизвести новый организм благодаря кооперативной комбинации нескольких частей кода, каждый из которых воспроизведен одним из организмов. Однако и здесь могут появиться организмы, захватывающие для воспроизводства себе подобных части кода, создаваемые другими организмами в процессе кооперативного взаимодействия.

Таким образом, в виртуальной машине Tierra идет процесс эволюции, во время которого появляются и гибнут цифровые виды. Цифровые организмы, оказывающиеся наиболее приспособленными к условиям существования, начинают вытеснять менее приспособленные виды, захватывая все большее и большее пространство оперативной памяти. Однако появляющиеся в результате мутаций новые виды цифровых организмов могут со временем вытеснить доминирующий вид и т.п.

Следует, однако, заметить, что хотя до сих пор описывались механизмы эволюционного развития, возникающие при взаимодействии различных организмов друг с другом, существует и

другой тип адаптации — когда в результате мутаций появляются организмы, более приспособленные к существованию не за счет «притеснения» других видов, а за счет своего более оптимального «строения». Одним из таких механизмов является компактный код — в результате мутаций появляются цифровые организмы, размер которых оказывается существенно меньше, но не за счет паразитизма, а за счет упрощения алгоритма воспроизводства. Самый «компактный» цифровой организм, существование которого было отмечено в виртуальной машине, имел размер 22 байта (вместо первоначальных 80) — он был почти в 4 раза короче, а скорость его воспроизводства в 6 (!) раз превышала скорость воспроизводства цифровых организмов других видов.

Однако оптимизация строения вовсе не означает упрощения и сокращения кода цифрового организма. В ходе эволюции были, например, отмечены цифровые организмы, которые при самовоспроизводстве копировали в оперативную память не только полностью свой код, но и еще один (или несколько) байтов своего организма. Таким образом, организм, имевший размер в 23 байта, копировал при своем воспроизводстве еще один дополнительный байт, а следовательно, после того, как код этого организма был выполнен 23 раза, в оперативной памяти появлялся еще один дополнительный организм этого типа.

Для описания процесса эволюционного развития можно ввести количественную характеристику того, насколько эффективен алгоритм воспроизводства того или иного организма. Этой характеристикой является отношение числа машинных инструкций, выполняемых при воспроизводстве, к числу байт, из которых состоит организм. Фактически эта величина характеризует число машинных инструкций, необходимых для копирования одного байта. Исследования показывают, что с течением эволюционного процесса эффективность алгоритма воспроизводства цифровых существ увеличивается.

Полученные результаты оказываются весьма любопытными, но возникает весьма резонный вопрос: А что же дальше? Каковы дальнейшие направления возможных исследований? Возможна ли дальнейшая эволюция цифровых организмов и существует ли хотя бы гипотетическая возможность использования полученных результатов в практической деятельности человеческого общества?

Одним из наиболее интересных является вопрос о возможности существования сложных цифровых организмов. В свое время биологическая жизнь на Земле прошла этап развития от

одноклеточных организмов к сложным многоклеточным, причем разнообразие возможных сложных форм биологической жизни оказалось на удивление велико. Если продолжать проводить аналогии, то вышеописанная цифровая эволюция аналогична биологической эволюции отдельных биологических клеток, а каждое цифровое существо представляет собой по сути дела цифровую «клетку». Тогда следующим шагом на пути эволюционного развития должно быть возникновение «многоклеточных» цифровых организмов. Стоит отметить следующую особенность — многоклеточный организм может состоять из большого числа как одинаковых клеток, развивающихся по одинаковым правилам (хотя, может быть, и не синхронно), так и разных, развивающихся по разным правилам и выполняющим различные функции. Современные биологические организмы сочетают в себе обе возможности. А что можно сказать про цифровые организмы? Понятно, что раз речь идет об одновременном (параллельном) существовании большого числа цифровых «клеток», то сколь-нибудь сложный цифровой организм может возникнуть в «компьютерной среде», состоящей из большого числа компьютеров, где одновременно центральными процессорами различных компьютеров выполняется множество параллельных задач.

И здесь также возможны два вида одновременно выполняющихся задач — одинаковые задачи (фактически каждый процессор выполняет одну и ту же задачу, но за счет большого числа параллельно работающих процессоров вся совокупность задач выполняется быстрее, нежели она была бы выполнена одним процессором) и разные задачи (каждый процессор выполняет свою уникальную задачу). Ряд современных компьютерных программ допускают «распараллеливание», т.е. выполнение их несколькими процессорами, но это распараллеливание относится к первому типу, когда все процессоры выполняют одну и ту же задачу. Понятно, что программное обеспечение, которое бы было способно работать на нескольких процессорах по алгоритму второго типа (каждый процессор выполняет свою задачу), разработать невозможно труднее.

Таким образом, следующим логичным этапом исследования цифровой эволюции является соединение виртуальных машин Tierra, работающих на различных компьютерах, в единую сеть. Возможным красивым способом решения этой задачи было бы выполнение в фоновом режиме (т.е. когда на компьютере выполняется какая-либо другая программа, виртуальная машина Tierra

находится в режиме ожидания, а когда ресурсы машины свободны, Тиегга вновь начинает работать) работы виртуальных машин на компьютерах, подключенных к сети Интернет. Здесь вступают в игру новые аспекты — распределенность пространства оперативной памяти, различные размеры локальных пространств оперативной памяти, различное число машинных команд, выполняемых в единицу реального времени различными процессорами (это может быть связано как с различными типами процессоров, так и с различной степенью их загруженности). Все это может привести как к возникновению «многоклеточных» цифровых существ, так и проявлению у них различных «поведенческих инстинктов» (например, суточная миграция по виртуальным машинам Тиегга, работающим на компьютерах, подключенных к сети Интернет — понятно, что на компьютерах, расположенных в ночной зоне Земли, меньше загрузка, а следовательно, больше ресурсов будет отдано виртуальным машинам Тиегга и в конечном счете — цифровым организмам).

Наконец, еще один вопрос, связанный с цифровой эволюцией, — вопрос о возможности возникновения «цифрового интеллекта» (или, может быть, лучше сказать «цифрового разума»). Эта тема является благодатной почвой для научно-фантастических произведений (без сомнения, каждый читатель вспомнит ни одно научно-фантастическое произведение, в той или иной степени обыгрывающее эту тему; мы упомянем лишь цикл рассказов А. Азимова (Азимов, 2007)). В настоящее время трудно сказать по этому поводу что-либо определенное, но если возникновение «цифрового разума» и возможно, то, по всей вероятности, он может существенно отличаться от разума «биологического», поскольку ход эволюционного развития цифровой жизни происходит по другим законам, нежели развитие биологической жизни. Но возможно существование общих закономерностей эволюционного развития, свойственных самым различным формам жизни, а следовательно, и «цифровой разум» (конечно, если его возникновение возможно) может быть похож на разум биологический. Но пока все это остается лишь на уровне гипотез, и дать ответы на поставленные вопросы может лишь время.

В завершение кратко остановимся на вопросе о том, что могут дать человечеству исследования в области искусственной жизни. С одной стороны, эти исследования могут служить ключом к пониманию наиболее общих закономерностей эволюционного развития. С другой стороны, если люди научатся понимать эти

закономерности, то вмешиваясь в естественный ход эволюции цифровой жизни, внося изменения в структуру организмов, проводя селекцию организмов с нужными свойствами, может быть, удастся «вырастить» программные продукты (например, операционные системы, которые управляют работой компьютеров) с такими возможностями, которые сегодня трудно представить. Понимание же наиболее общих закономерностей эволюционного развития может быть использовано и при селекции новых биологических видов. Но еще раз подчеркнем, что все это — дело отдаленного будущего (хотя, может быть, мы и ошибаемся).

Литература к главе 3

- Азимов А. Я — робот. М.: Эксмо, 2007.
- Алексеев А.С. Массовые вымирания в фанерозое: Диссертация в форме научного доклада на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Москва. МГУ, 1998.
- Алексеев А.С. Современное состояние проблемы вымирания // Современное состояние и основные направления изучения брахиопод. Докл. IV Междунар. школы. Звенигород, 28 октября — 3 ноября 1991 г. М.: ПИН РАН, 1995. С. 21—50.
- Леонович А.А. Физический калейдоскоп. М.: Бюро Квантум (Приложение к журналу «Квант». Вып. 2), 1994.
- Alvarez L.W. Mass extinctions caused by large bolide impacts. *Physics Today*. 1987. N 40. P. 24.
- Amaral L.A.N., Meyer M. Environmental changes, coextinction, and patterns in the fossil record // *Phys. Rev. Lett.* 1999. N 82. P. 652.
- Bak P. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York. Copernicus. 1996.
- Bak P., Sneppen K. Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution // *Phys. Rev. Lett.* 1993. N 71. P. 4083.
- Bak P., Tang C. Earthquakes as a Self-Organized Critical Phenomenon // *J. Geophys.* 1989. Res. 94 (B11).
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise // *Phys. Rev. Lett.* 1987. N 59, 381.
- Benton M.J. Extinction, biotic replacements and clade interactions. In *The Unity of Evolutionary Biology*. Dudley E.C. (ed.). Portland. Dioscorides, 1991.
- Benton M.J. *The Fossil Record 2*. London. Chapman and Hall, 1993.
- Burlando B. The fractal dimension of taxonomic systems // *J. Theor. Biol.* 1990. N 146.
- Burlando B. The fractal geometry of evolution // *J. Theor. Biol.* 1993. N 163, 161.
- Ellis J., Schramm D.M. Could a nearby supernova explosion have caused a mass extinction? *Proc. Natl. Acad.* 1995. Sci. 92.
- Garis H. de. Evolvable hardware: Genetic programming of a Darwin machine // Albrecht R.F., Reeves C.R., Steele N.C. [eds.]: *Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*. Wien; New York; Springer-Verlag, 1993. P. 441—449.
- Hallam A. The case for sealevel change as a dominant causal factor in mass extinction of marine invertebrates // *Phil. Trans. R. Soc.* 1989. B 325.

Hillis D.W. Co-evolving parasites improve simulated evolution as an optimization procedure // Langton C., Taylor C., Farmer J.D. & Rasmussen S. [eds], *Artificial Life II*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Redwood City, CA: Addison-Wesley. 1991. Vol. X, 313–324.

Hoffman A.A., Parsons P.A. *Evolutionary Genetics and Environmental Stress*. Oxford. Oxford University Press, 1991.

Hong J.I., Feng Q., Rotello V., Rebek J. Competition, cooperation, and mutation: improving a synthetic replicator by light irradiation // *Science*. 1992. N 255.

Jablonski D. Background and mass extinctions: The alternation of macroevolutionary regimes // *Science*. 1986. N 231.

Koza J.R. Genetic programming, on the programming of computers by means of natural selection. Cambridge, MA: MIT Press, 1992. P. 819.

Loper D.E., McCartney K., Buzyna G. A model of correlated periodicity in magnetic-field reversals, climate and mass extinctions // *J. Geol.* 1988. N 96.

May R.M. How many species? // *Phil. Trans. R. Soc.* 1990. B 330.

Newman M.E.J. Selforganized criticality, evolution and the fossil extinction record // *Proc. R. Soc. London*, 1996. B 263, 1605–1610.

Newman M.E.J. A model of mass extinction // *J. Theor. Biol.* 1997. N 189.

Newman M.E.J. Simple models of evolution and extinction. *Computing in Science and Engineering*. 2000. N 2.

Newman M.E.J., Eble G.J. Power spectra of extinction in the fossil record // *Proc. R. Soc. London*, 1999. B 266.

Newman M.E.J., Palmer R.G. *Modeling Extinction*. Oxford University Press, 2003.

Newman M.E.J., Roberts B.W. Mass extinction: Evolution and the effects of external influences on unfit species // *Proc. R. Soc. London*, 1995. B 260.

Newman M.E.J., Sibani P. Extinction, diversity and survivorship of taxa in the fossil record // *Proc. R. Soc. London*, 1999. B 266.

Newman M.E.J., Sneppen K. Avalanches, scaling and coherent noise // *Phys. Rev. E*. 1996. N 54.

Patterson C., Smith A.B. Is the periodicity of extinctions a taxonomic artifact? // *Nature*. 1987. N 330.

Patterson C., Smith A.B. Periodicity in extinction: the role of the systematic // *Ecology*. 1989. N 70.

Raup D.M. Size of the PermoTriassic bottleneck and its evolutionary implications // *Science*. 1979. N 206.

Raup D.M. A kill curve for Phanerozoic marine species // *Paleobiology*. 1991. N 17.

Raup D.M., Boyajian G.E. Patterns of generic extinction in the fossil record // *Paleobiology*. 1988. N 14.

Raup D.M., Sepkoski J.J.Jr. Periodicity of extinctions in the geologic past // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1984. N 81.

Raup D.M., Sepkoski J.J.Jr. Periodic extinctions of families and genera // *Science*. 1986. N 231.

Raup D.M., Sepkoski J.J.Jr. Testing for periodicity of extinction // *Science*. 1988. N 241.

Ray T.S. An approach to the synthesis of life // Langton C., Taylor C., Farmer J.D., Rasmussen S. [eds]. *Artificial Life II*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. 1991. Vol. X, 371–408. Redwood City, CA: Addison-Wesley.

Ray T.S. Evolution, Complexity, Entropy, and Artificial Reality // *Physica D*. 1994. N 75.

Roberts B.W., Newman M.E.J. A model for evolution and extinction // J. Theor. Biol. 1996. N 180.

Rosenzweig M.L. Species Diversity in Space and Time. Cambridge. Cambridge University Press, 1995.

Sepkoski J.J.Jr. The taxonomic structure of periodic extinction // Global Catastrophes in Earth History. Sharpton V.L., Ward P.D. (eds.). Geological Society of America Special Paper. 1990. N 247.

Sepkoski J.J. A compendium of fossil marine animal families, 2nd edition. Milwaukee Public Museum Contributions in Biology and Geology, 1993.

Signor P.W., Lipps J.H. Sampling bias, gradual extinction patterns, and catastrophes in the fossil record // Geological Implications of Impacts of Large Asteroids and Comets on the Earth / Silver L.T., Schultz P.H. (eds.). Geological Society of America Special Paper. 1982. N 190.

Smith M.J. The causes of extinction // Phil. Trans. R. Soc. 1989. B 325.

Sneppen K. Extremal dynamics and punctuated coevolution // Physica A. 1995. 221.

Solé R.V. On macroevolution, extinctions and critical phenomena // Complexity. 1996. N 1.

Solé R.V., Bascompte J., Manrubia S.C. Extinction: Bad genes or weak chaos? // Proc. R. Soc. London, 1996. B 263.

Solé R.V., Manrubia S.C. Extinction and selforganized criticality in a model of largescale evolution // Phys. Rev. 1996. E 54, R42.

Stanley S.M. Marine mass extinction: A dominant role for temperature // Extinctions / Nitecki M.H. (ed.). Chicago. University of Chicago Press, 1984.

Valen L. van. A new evolutionary law // Evol. Theory. 1973. 1.

Vandewalle N., Ausloos M. The robustness of selforganized criticality against extinctions in a treelike model of evolution // Europhys. Lett. 1995. 32.

Vandewalle N., Ausloos M. Different universality classes for selforganized critical models driven by extremal dynamics // Europhys. Lett. 1997. 37.

Wilde P., Berry W.B.N. Destabilization of the oceanic density structure and its significance to marine extinction events // Palaeogeog. Palaeoclimatol. 1984.

Wilke C., Martinetz T. Simple model of evolution with variable system size // Phys. Rev. 1997. E 56.

Willis J.C. Age and Area. Cambridge University Press (Cambridge), 1922.

Yaeger L. Computational genetics, physiology, metabolism, neural systems, learning, vision, and behavior or PolyWorld: life in a new context // Artificial Life III, [Ed.] Christopher G. Langton, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Proc. Vol. XVII, Addison-Wesley. 1994. P. 263–298.

Zipf G.K. Human Behavior and the Principle of Least Effort. Addison–Wesley, 1949.



4.1. Урбосфера как глобальная система

Существующая сеть городских поселений характеризуется огромным разнообразием типов, созданных человеческим обществом со времени его возникновения и связанных между собой элементами инженерной инфраструктуры (транспортными сетями, надземными и подземными коммуникациями и т.д.), является уникальным свойством урбанизированного пространства. Современное системное строение Земли — результат эволюции планеты и жизни на ней. При взаимодействии природных (геолого-геоморфологический субстрат, рельеф, микроклимат и др.) и антропогенных факторов формируются новые, природно-антропогенные системы, к наиболее выраженным из которых относится **урбосфера**, определяемая как географическое пространство, осваиваемое (и освоенное) градостроительством — городами, поселками и связующими их коммуникациями — и в какой-либо степени включенное в сферу интересов горожан (места отдыха, работы, источники ресурсов и т.д.) (Очерки ..., 2009).

С момента возникновения и развития урбосферы глобальная сеть городских поселений характеризуется процессом **урбанизации** — историческим процессом повышения роли городов и городского образа жизни в развитии общества, который вызывает социально-экономические преобразования города и сельской местности на основе интенсивного развития индустрии, транспорта, жилищного строительства, массовых коммуникаций, отраслей обслуживания, путем распространения городского образа жизни, городской иерархии ценностей, форм общения в самые отдаленные сельские поселения. Городские отношения во всей широте своего социального содержания и составляют сущность глобального процесса урбанизации, которую иногда называют «тихой революцией XX столетия» (Лаппо, 1997). Доля городского населения во всем населении стран очень различна и характеризу-

ется понятием **степени урбанизированности**. Государство с долей городских жителей более 50% — высокоурбанизированное, от 20 до 50% — среднеурбанизированное, менее 20% — низкоурбанизированное. Сокращение численности населения крупных городов, характерное для некоторых городов развитых стран, называется **дезурбанизацией** и происходит по причине ухудшения природной и социальной среды жизни в крупных городах.

Система расселения по территории страны характеризуется выделением различных типов поселений, или населенных пунктов. Изначально под **поселением** понимается территориально целостный и компактный ареал концентрации населения со всеми необходимыми условиями и оборудованием для жизни, труда и отдыха людей. В России, где согласно данным переписи населения 2010 г., городское население в общей численности составляет 74%, доминирующими являются городские поселения.

Законодательная база нашей страны предполагает выделение двух видов городских поселений — городов и поселков городского типа (рабочих поселков). **Городом в России** считается населенный пункт с численностью населения более 12 тыс. человек и при условии, что более 85% его жителей занято вне сельского хозяйства, выполняющий промышленные, организационно-хозяйственные, управленческие, культурные, транспортные и другие функции, не связанные с аграрным сектором и его обслуживанием. При отнесении населенных пунктов к городским обычно фигурируют три критерия: а) численность населения, б) характер застройки, в) сфера занятости населения.

Изначально город по русской терминологии — это населенный пункт, имеющий по периметру искусственное ограждение в виде стен из любого материала. Они могли и часто сочетались со рвами и валами. При этом было совершенно не важно, кто находился внутри: гарнизон, гражданское население или те и другие. В случае осады все население осуществляло оборону. Не принимались во внимание архитектурно-планировочная структура города, занятия жителей (Флеров, 2011).

Формирование городов является закономерным этапом эволюции поселений. Существуют различные подходы к определению понятия «город» и времени их появления.

Определения понятия «город» существенно отличаются в различных науках. Город как объект изучения приковывает вни-

мание специалистов-урбанистов, экологов, географов, геологов, архитекторов, экономистов, медиков и многих других. И каждый находит свое поле профессиональной деятельности. Можно выделить четыре основных методических подхода к изучению города: 1) город как территориальная единица и экосистема; 2) город как архитектурно-планировочная система; 3) город как социально-экономическая система; 4) город как культурологический объект.

Компактная пространственная группировка городских поселений, объединенных интенсивными производственными и культурными связями в сложную многокомпонентную динамическую систему, называется **городской агломерацией**. Граница городских агломераций определяется по конечным пунктам маятниковых миграций (Семенов, Штомпель, 2009). В иерархии форм расселения в различных странах мира есть немало примеров более крупных урбанизированных территориальных образований. Так, группу агломераций населенных пунктов, представляющую собой, как правило, обширную урбанизированную зону полосовидной конфигурации, называют **мегалополисом**. Впервые термин применен для обозначения сплошной городской застройки вдоль Атлантического побережья США (протяжённостью свыше 1000 км и шириной местами до 200 км), состоящей из связанных между собой агломераций Бостона, Нью-Йорка, Филадельфии, Балтимора, Вашингтона.

Другой вид городского поселения — **поселок городского типа** — это населенный пункт с численностью населения более 3 тыс. человек при условии, что более 85% его жителей занято вне сельского хозяйства, и выполняющий преимущественно не-сельскохозяйственные функции. При этом в большинстве случаев основой поселков городского типа является одно градообразующее предприятие, что делает их статус весьма неустойчивым (история знает многочисленные примеры как превращения таких поселков в города, так и их «разжалования» в села и даже исчезновения).

Сложное сочетание узлов, в качестве которых выступают города и городские агломерации — фокусы экономической, политической, культурной жизни страны или региона, и линейных элементов — транспортных магистралей формирует **опорный каркас расселения** (Лаппо, 1997).

4.2. Нелинейность в городах

Города как системы, построенные из пространства природной и техногенной среды и городского населения, обладают характерными свойствами самоорганизации. Сегодня уже становится очевидным, что научное осмысление эволюции городских территорий, их систем и сетей невозможно без применения аппарата нелинейной динамики. В научной географической, георбанистической и экологической литературе все чаще встречаются исследования, посвященные изучению нелинейных свойств городского пространства: фрактальности, устойчивости, самоорганизованной критичности, хаотических колебаний, кризисных явлений. Создаются качественные и количественные модели самоорганизации городов. Пионерами в изучении нелинейности городов являются зарубежные исследователи. В частности, хорошо известна монография «Fractal Cities» (Batty, Longley, 1994), подготовленная Майклом Бетти — профессором Национального центра географической информации и анализа в Государственном университете Нью-Йорка и Полом Лонгли — профессором географического факультета университета в г. Бристоль. Одним из направлений исследования этих авторов является изучение фрактальной размерности площади городских территорий, рост которых рассматривается ими как пример самоорганизации (рис. 4.1). Авторы осознают, что фрактальная геометрия находится только в начальной стадии своего практического приложения в георбанистике: «...есть примеры городов, которые могут быть интерпретированы как фрактальные в геометрическом смысле, но пока не существует такой теории, которая могла бы собрать все их многообразие вместе».

В отечественной литературе также известны работы, в которых исследователи применяли фрактальную геометрию к изучению пространственного порядка в городах. Аппарат фрактального анализа использовался с позиции визуального представления городских форм с помощью компьютерных моделей или при измерении значений показателя фрактальной размерности элементов городской функциональной застройки: транспортной сети, подземных коммуникаций, долинной и ливневой сетей, схем площадного распространения опасных загрязняющих веществ в урбосистеме — тяжелых металлов в почве и снежном покрове, ветровых коридоров и их миграционных потоков и др. Известны работы по

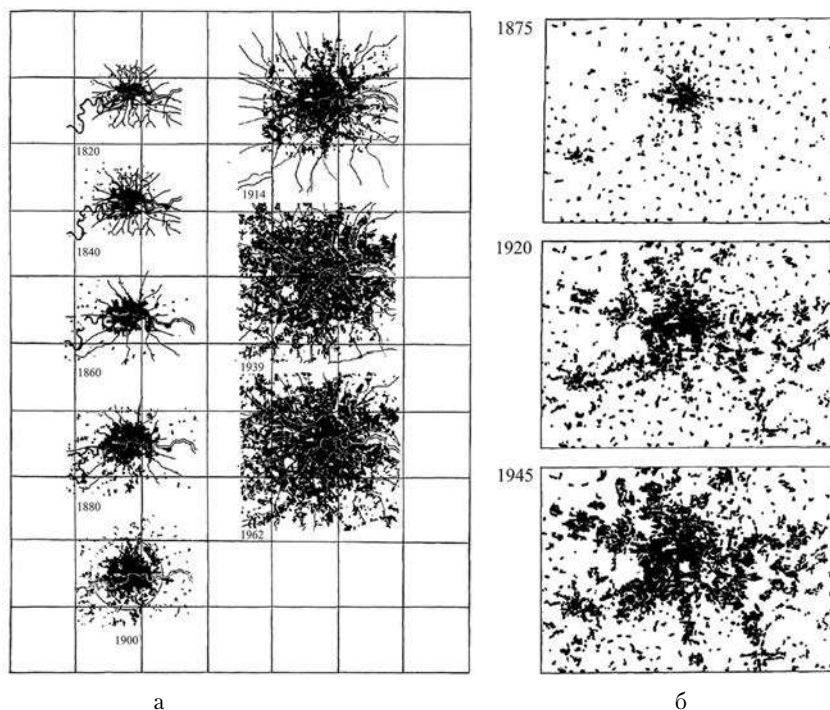


Рис. 4.1. Иллюстрация эволюции площади городской территории Лондона (а) и Берлина (б) как классического примера фрактальной структуры (Batty, Longley, 1994)

изучению фрактальных свойств облаков радиоактивной пыли, распространяемых в атмосфере в результате техногенной катастрофы в СССР на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г. (Манжуров, 2002).

В русскоязычном переводе работы английских исследователей Зиауддина Сардара — профессора Городского университета Лондона и Ивоны Абрамс «Хаос без аспирина» (Саранск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006) в научно-популярной форме изложены представления о теориях хаотических городов. Авторы отмечают, что «...города изменились, равно как и наш взгляд на них. Города превратились из упорядоченных, управляемых организаций в дикие среды, не поддающиеся контролю...». Большое внимание авторы уделяют анализу уже упомянутой работы М. Бетти и П. Лонгли «Fractal Cities», исследованиям П. Аллена по теории диссипатив-

ных городов, идеям И. Пригожина и появлению в связи с изучением им теории самоорганизации понятия самоорганизованных городов.

Все города, как полагают З. Сардар и И. Абрамс, являются «идеальными кандидатами для применения фрактальной геометрии», так как городские улицы, районы и кварталы, транспортные сети разных порядков имеют ту или иную степень нерегулярности. Фрактальную структуру создают не только различные функциональные зоны города, но и их региональные и глобальные сети. Изучение фрактальных свойств городов дает широкую возможность оценки различных географических (плотность населения) и землеустроительных (использование земли и структуру пространства) аспектов развития городской территории (Сардар, Абрамс, 2006).

На сегодняшний день, по мнению М. Бетти, одной из ключевых в теории фрактальности городов выступает задача поисков применения численного алгоритма расчета фрактальной размерности, связывающей количество населения и его плотность с линейными размерами и площадью города, к эволюции городского

пространства: «С помощью фрактальной геометрии можно исследовать геометрию городов, сначала устанавливая размер и изменяя масштаб, а потом устанавливая масштаб и изменяя размер. Эта идея представляется наиболее важной для разработки теории фрактального города». Математические модели, связывающие линейные размеры города, его площадь с количеством и плотностью городского населения, формируют ло-

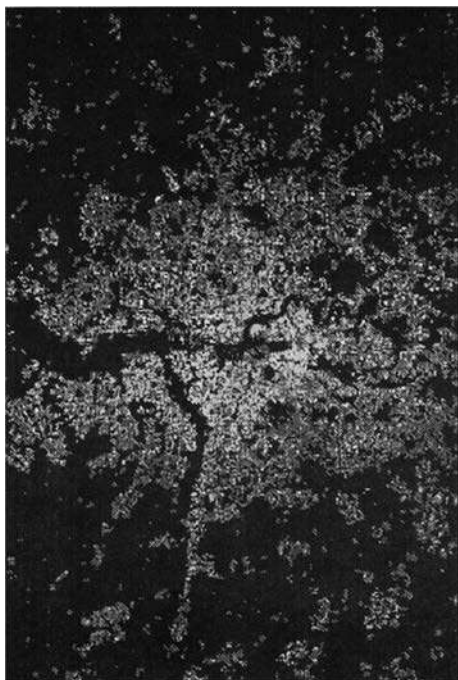


Рис. 4.2. Схема плотности населения фрактального города Лондона (Сардар, Абрамс, 2006)

гичные фрактальные связи (Сардар, Абрамс, 2006). Рисунок 4.2 графически иллюстрирует «фрактальную картину» города Лондона.

В работе З. Сардар и И. Абрамс продемонстрировали примеры и других типов хаотических городов. В частности, речь идет о теории диссипативных городов, получившей практическое развитие на основе идей и взглядов Ильи Пригожина о диссипативных структурах. Одним из разработчиков теории диссипативных городов является П. Аллен — профессор Международного экотехнологического исследовательского центра университета Кранфилда (Великобритания). Теория диссипативных городов основана на компьютерном моделировании экономической инфраструктуры городских территорий, в том числе географии трудовой миграции. Потоки трудовых ресурсов, как утверждает П. Аллен, формируют «местную “пропускную способность” и приводят к возникновению нелинейностей и петель обратной связи в системе, связывающей население с областью производства».

Работы по теории самоорганизации и математические модели И. Пригожина подтолкнули исследователей к поиску новых идей, описывающих различные эволюционные и социальные процессы в городе. В науке закрепились понятия «самоорганизованных городов» или «хаотических городов». В работе З. Сардара и И. Абрамса также отмечено, что транспортные сети и автомобильные потоки тоже подчинены законам самоорганизации. Локальный или микроскопический хаос в городах может быть продемонстрирован особенностями движения машин по автостраде (рис. 4.3), а глобальный макроскопический или детерминированный хаос «возникает, когда, вследствие самоорганизации, отдельные части притягиваются несколькими аттракторами. Город хаотическим образом бросает от одного аттрактора к другому. Например, ночью движение машин по автостраде распределено случайным образом, тогда как в часы пик это распределение близко к однородному» (рис. 4.4).

Особое направление в теории самоорганизации городов — изучение фракталь-



Рис. 4.3. «Локальный хаос» в рисунке городских автомагистралей



Рис. 4.4. Пример детерминированного хаоса: движение машин по автострате в час пик (Сардар, Абрамс, 2006)

ной размерности архитектурной среды города, квартальной планировки, объектов культурного наследия.

В литературе, посвященной нелинейной природе объектов городской архитектуры, авторы обращают внимание на то, что формирование городской архитектурной среды идет по искусственно созданному и естественно сложившемуся путям. В работе

Е.А. Кропаневой (Кропанева, 2007) отмечено, что «искусственно-созданная фрактальная архитектура» интуитивно или сознательно демонстрирует выраженное архитектором или строителем стремление «создать фрактальные системы». Наиболее типичными примерами фрактальности в архитектуре являются шедевры готического Средневековья — Кельнский собор и Собор Парижской Богоматери (Нотр-Дам-де-Пари) (рис. 4.5, 4.6).

Фрактальная архитектура городов, развивающаяся естественным путем, представляет собой наиболее сложный и длительный процесс формирования «особого духовного и образного мира» города, в ходе которого в плановой структуре городскихстроений, улиц и кварталов проявляются признаки самоподобия. Так, например, естественно сложившаяся фрактальная структура многих древних и средневековых городов, по мнению Е.А. Кропаневой, в настоящее время «интерпретируется по-новому» как в реконструкции самих старинных городов (рис. 4.7), так и в преобразовании архитектурной среды вновь застраиваемых городских территорий (рис. 4.8).

В современной теории и практике архитектуры и градостроительства рассматриваются вопросы изучения развития градостроительных



*Рис. 4.5. Фрактальная архитектура Кельнского собора
(г. Кёльн, Германия) (фото И.А. Яшкова)*



*Рис. 4.6. Фрактальная архитектура Собора Парижской Богоматери
(г. Париж, Франция) (фото И.А. Яшкова)*



Рис. 4.7. Фрактальные силуэты древнего города Самарканда (Узбекистан)
(фото М.В. Ковалева)



Рис. 4.8. Фрактальный силуэт современной мечети Имангали
(г. Атырау, Казахстан) (фото М.В. Ковалева)

систем с позиции анализа взаимосвязи процессов управления и самоорганизации. Одной из наиболее известных работ в этом направлении является докторское диссертационное исследование Л.Г. Тарасовой «Градостроительное планирование и регулирование развития крупных городов с учетом действия процессов самоорганизации» (2010), в котором автор с помощью теории самоорганизации рассматривает механизмы поведения градостроительных систем, возможные варианты их развития и модели управления этим развитием. Термин «управление» понимается автором диссертации в широком смысле и с позиций синергетики «предполагает замену на термин “регулирование”, означающий мягкое управление, действующее в резонанс с имманентными тенденциями развития системы». В работе автор обстоятельно рассматривает вопросы устойчивости градостроительной системы через различные механизмы. Так, автором отмечается, что для отечественного градостроительства классической рациональности — первого исторического типа, характерного для городов XVIII—XIX вв., устойчивое состояние и эффективное функционирование возможно в небольших, относительно просто устроенных городах.

В практике градостроительства неклассической рациональности, сформировавшейся к середине XX в. в нашей стране, система устойчивого развития городов формировалась на механизмах жесткого внешнего управления, характерного для советской теории градостроения. Как уже было отмечено при анализе работы В.Г. Туркиной (2010), именно к этому историческому типу относится строительство многочисленных соцгородов с монопрофильным производством и значительной зависимостью от географии ресурсной базы и схем экономической кооперации, многие из которых с середины 90-х гг. прошлого столетия либо полностью исчезли, либо оказались в числе неперспективных городов.

Градостроительная практика постнеклассической рациональности, характерная для России конца XX — начала XXI в., по мнению Л.Г. Тарасовой, опирается на «разработку единых моделей анализа градостроительных систем различных уровней с использованием количественных и графоаналитических методов».

Широкий практический интерес в работе Л.Г. Тарасовой имеют раскрываемые автором условия и механизмы взаимодействия процессов самоорганизации и управления в историческом развитии города Саратова. На основе анализа генеральных планов г. Са-

ратова советского и постсоветского периодов изучены закономерности градостроительного развития с позиций синергетического подхода. В одном из выводов автора говорится о «недостаточном учете аспекта самоорганизации в положениях Градостроительно-го кодекса, градостроительной документации».

Философские оценки эволюции городских территорий, а также социальных, политических, экологических и других процессов, происходящих внутри городского пространства, также широко распространены в современной научной литературе. Так, например, в работе В.Г. Туркиной рассматриваются идеи синергетических предпосылок возникновения и развития города, а сам город описывается автором как «синергетическая самоорганизующаяся структура» (Туркина, 2008).

По мнению автора, длительное, стабильное существование города можно охарактеризовать понятием «устойчивость», а исчезновение или, напротив, бурный рост является одним из синергетических свойств города — неустойчивость. Такое восприятие автором «устойчивых» и «неустойчивых» признаков эволюции города основано на, возможно, собственной классификации городов. Так, по мнению В.Г. Туркиной, «развитые, значимые, устойчивые города крайне редко испытывают жесткую бифуркацию полного исчезновения (смерти). Они могут лишь менять свое качество: например, сильно уменьшаться в размерах, менять свой статус, но почти никогда не исчезают полностью, такой город нельзя просто стереть с лица земли. Никакие природные катастрофы, катаклизмы, политические кризисы, войны не могут привести к исчезновению города, если у него есть длительная история, культурные традиции, накоплен определенный субстрат, налажены экономические и политические связи».

К другой категории городов, которые при нелинейно-динамическом подходе могут быть охарактеризованы как неустойчивые, В.Г. Туркина относит города, «примитивные по структуре, субстрату, так называемые соцгорода при производствах, столь многочисленные в бывшем СССР». Неустойчивость таких городов, по мнению автора, изначально заложена в их сырьевом и монопрофильном производстве, что в результате «жесткой бифуркации приводит к быстрому и неминуемому умиранию». К аналогичным выводам приходят авторы книги «Кладбище соцгородов: градостроительная политика в СССР 1928—1932 гг.» (Меерович, Конышева, Хмельницкий, 2011). Социалистические

города в концепции одного из ее главных инициаторов Л. Сабсо-
вича — «официального могильщика идей дезурбанистов» — были
призваны «справиться с задачей радикально изменить жилищные
условия трудящихся СССР, “снести с лица земли” все существую-
ющие города, села и деревни в их теперешнем виде и построить
вместо них новые поселения — здоровые, культурные, приспособ-
ленные для осуществления обобщественного быта и этот быт
создающие». Сталинская политика строительства соцгородов
«для размещения подневольного населения» в действительности
же оказалась примером насильственной урбанизации и, по мне-
нию авторов, «вся страна, весь Советский Союз оказался “кладби-
щем мечты о соцгороде”».

В современной России отчетливо прослеживается тенденция
сокращения количества городских поселений (см. таблицу).

«Вымирание» городских поселений в том объеме, в котором
оно зафиксировано после 1989 г., имеет несколько причин, о кото-
рых нет содержательных сведений в официальных опубликован-
ных документах по итогам Всероссийских переписей населения
1997, 2002 и 2010 гг. Приводятся данные лишь по соотношению
горожан и сельских жителей. Что касается катастрофического
«вымирания» сельских населенных пунктов, отмечается, что за
межпереписные периоды число сельских населенных пунктов без
населения в 2002 г. составляло 13 086, а в 2010 г. при переписи
было зафиксировано 19 416 сельских населенных пунктов, в ко-
торых население фактически не проживало. Таким образом, за
восемь лет межпереписного периода число сельских населенных
пунктов уменьшилось еще на 8500. Эта негативная динамика про-
исходит за счет включения сельских населенных пунктов в черту

**Динамика количества городских поселений России по типам
за 1926—2010 гг. (по материалам статьи Яшкова, Иванова, 2012)**

Тип городского поселения	Переписи населения России (год)								
	1926	1939	1959	1970	1979	1989	1997	2002	2010
Города и поселки городского типа	1163	1317	2372	2838	3045	3230	3078	2940	2386
Города	461	574	877	969	999	1037	1087	1098	1100
Поселки городско- го типа	702	743	1495	1869	2046	2193	1991	1842	1286

городов и поселков городского типа, а также их ликвидации по решениям местных органов власти в связи с естественной убылью и миграционным оттоком населения в другие населенные пункты (Всероссийская перепись ..., 2009—2012).

Не менее болезненные тенденции происходят в географии городских населенных пунктов. Так, по данным переписи населения 2010 г., общее количество городских поселений составляло 2386, что почти соответствует аналогичным показателям переписи населения 1959 г. Количество поселков городского типа в 2010 г. составляло 1286, аналогичные показатели были характерны для периода между переписями населения 1939 и 1959 гг., для социально-экономической и демографической ситуации перед началом Великой Отечественной войны. Причины «вымирания» городских поселений аналогичны причинам «вымирания» сельских населенных пунктов и связаны с включением поселков городского типа в черту городов и изменением статуса городского поселения. В отдельную группу выделены городские поселения, ликвидация которых происходит по решениям местных органов власти в связи с естественной убылью и миграционным оттоком (Яшков, Иванов, 2012).

На наш взгляд, именно аспект «смерти» городов менее всего изучен в современной геOURбанистике и градоведении и содержит вопросы, неполнота ответов на которые восполнима, на наш взгляд, в том числе с применением методического аппарата нелинейной динамики. Наш опыт обобщения и осмысления материала по феномену деградации урбосферы (Ivanov et al., 2012; Абылгазиев и др., 2012; Яшков и др., 2010), глобальным и региональным природным и социально-природным процессам (Абылгазиев и др., 2011) демонстрирует гораздо более сложные механизмы и предпосылки возникновения и развития процессов «смерти» урбосистем.

Философская природа самоорганизации городских территорий, их устойчивого развития, широко изучаемая современными специалистами-философами — А.Д. Урсолом (Урсул и др., 2012), В.В. Афанасьевой (Афанасьева и др., 2012), В.Г. Туркиной и другими, демонстрирует нелинейное осмысление и качественное моделирование эволюции отдельных городов. Наибольший интерес в изучении городов с точки зрения нелинейно-динамического подхода представляет практика количественного моделирования и построения строгих математических моделей эволюции городов.

4.3. Самоорганизация городских сетей

Работы зарубежных и отечественных авторов, посвященные использованию аппарата нелинейной динамики в изучении архитектурного облика города, городской инфраструктуры, сетей коммуникаций, полей геохимических загрязнений и т.п., достаточно многочисленны и широко известны на сегодняшний день. Опыт таких исследований описан нами выше. Очевидно, что города, подчиняясь географическому ходу урбанизации, проявляют тенденции к изменению своих размеров, числа жителей, к росту взаимосвязей с соседними населенными пунктами, образуя тем самым сети городских поселений.

Анализ современной научной литературы по вопросам самоорганизации сетей городов демонстрирует, во-первых, сравнительно ограниченное количество подобных работ, во-вторых, явный уклон в качественный анализ (без широкого использования строгого математического аппарата). Авторы согласны здесь с мнением В.И. Чупрынина (Чупрынин, 2008), который замечает, что сеть населенных мест как возникшую в результате самоорганизации регулярную структуру «с нелинейной точки зрения никто не анализировал».

Интересный практический опыт построения нелинейных моделей эволюции и функционирования городских поселений имеется в работах М. Бетти. В 2007 г. в продолжение исследований, описанных в работе 1994 г., выходит книга (Batty, 2007). Автором применен широкий математический аппарат для комплексного изучения состояния городских поселений. В сферу изучения методами нелинейной динамики включены многочисленные аспекты городской системы расселения: описаны модели роста и реконструкции городов и их пригородов, отражающие динамику развития урбанизации; модели использования городского пространства, взаимодействия населения, промышленных территорий и объектов сферы услуг. Построены адаптированные модели развития транспортной системы городов по пути разработки кратчайших маршрутов передвижения.

Наиболее известными в изучении самоорганизации процессов в городской среде являются работы, которые демонстрируют наличие различных нелинейных моделей, описывающих аттракторы социально-экономического развития России (Пугачева, Соловьяненко, 2003 и др.), долгосрочный прогноз основных

социально-экономических показателей и сценариев развития российских городов и крупных мегаполисов (Фаттахов, 2011), управление демографическими процессами и структуру демографической системы (Вишневский, 2005), специфику российской урбанизации (Шупер, 2008), динамику роста мировой урбанизации (описано в разд. 9.4 данной книги) и др.

В исключительно геоурбанистическом и географическом понимании размещение сети городских поселений и территориальная структура городов описаны рядом моделей, которые на качественном уровне позволяют характеризовать современные сети городов и урбосферу в целом рядом синергетических эффектов: самоорганизацией, фрактальностью, бифуркацией и др.

В работе Г.М. Лаппо «География городов» (1997) приведены слова Н.Н. Баранского: «С экономико-географической точки зрения, города плюс дорожная сеть — это каркас, остов, на котором

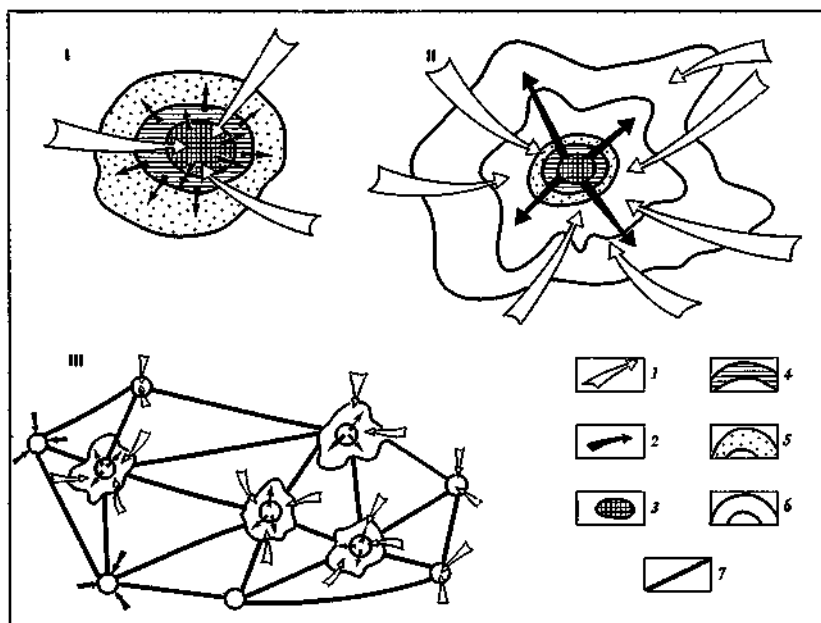


Рис. 4.9. Формы и стадии (I–III) территориальной концентрации (по Лаппо, 1997). Обозначены:

1 — центростремительные потоки; 2 — центробежные потоки; 3 — центральная часть города; 4 — срединная зона города; 5 — периферийная зона; 6 — зона спутников; 7 — межгородские магистрали

все держится, остов, который формирует территорию, придает ей определенную конфигурацию» (Лаппо, 1997, с. 113). Речь идет об опорном каркасе расселения, который Г.М. Лаппо называет «географическим образом страны», узлы и линии которого «создают вершины и хребты экономического рельефа территории». Опорный каркас территории страны формируется сложным сочетанием узлов, в качестве которых выступают города и городские агломерации, и линейных элементов — транспортных магистралей. В эволюции опорного каркаса расселения, по мнению Г.М. Лаппо, проявляются центростремительные и линейностремительные тенденции, которым свойственны три основные стадии: 1) центровая (точечная) концентрация — нарастание числа и увеличение размеров крупных городов; 2) агломерирование, когда крупный город, становясь ядром агломерации, формирует вокруг себя сеть спутников; 3) регионализация, при которой высокого уровня достигает имплозия — экономическое сближение взаимодействующих центров на основе совершенствования транспорта (Лаппо, 1997). Формы и стадии (1—3) территориальной концентрации представлены на рис. 4.9.

Сетевой характер взаимодействий между городскими поселениями отмечался известным немецким экономико-географом — автором теории центральных мест Вальтером Кристаллером, изучавшим сети городов Южной Германии еще в первой четверти XX в. Согласно В. Кристаллеру (1933), оптимальная система населенных пунктов обладает каркасно-сетевой структурой и иерархией, в которой число уровней прямо пропорционально социально-экономическому развитию территории. В основу сетевой модели положены условия

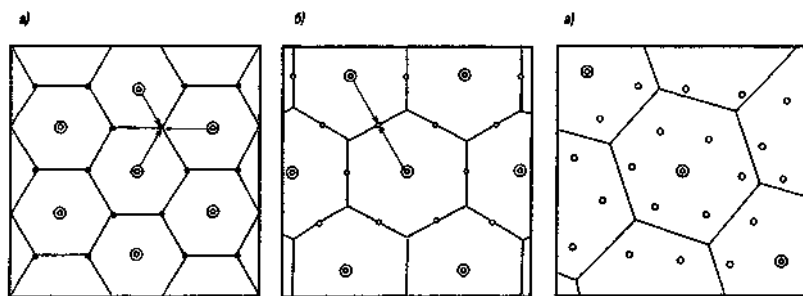


Рис. 4.10. Принципы организации территории по модели Кристаллера. Оптимизация структуры: а) рыночной при $K = 3$; б) транспортной при $K = 4$; в) административной при $K = 7$

взаимодействия города как центра своего окружения — центрально-го места (ЦМ) — с населенными пунктами близлежащей территории. Города-ЦМ одного ранга образуют на территории правильную гексагональную решетку (шестиугольник), при этом положение обслуживаемых поселений относительно ЦМ может быть различным (рис. 4.10) и зависеть от историко-географических предпосылок, особенностей социально-экономического развития региона, сети коммуникаций и дорог и т.д.

Своеобразие и индивидуальность опорных каркасов населения разных стран является характерным проявлением исторического хода формирования сети городских поселений. Явно выраженная неравномерность географического распределения опорного каркаса наблюдается и на глобальном уровне. Современный глобальный каркас расселения имеет четко выраженную широтную асимметрию распределения урбосистем (рис. 4.11).

Главный пояс урбанизации располагается в Северном полушарии между параллелями 30 и 40° и при ширине менее 1000 км сосредоточивает около 25% крупных городов мира. Крупнейшие субмеридиональные скопления городских агломераций — Восточно-Азиатское, Южно-Азиатское, Европейское, Северо-Американское — пересекают главный пояс урбанизации (Глобальные системы городов, 2012).

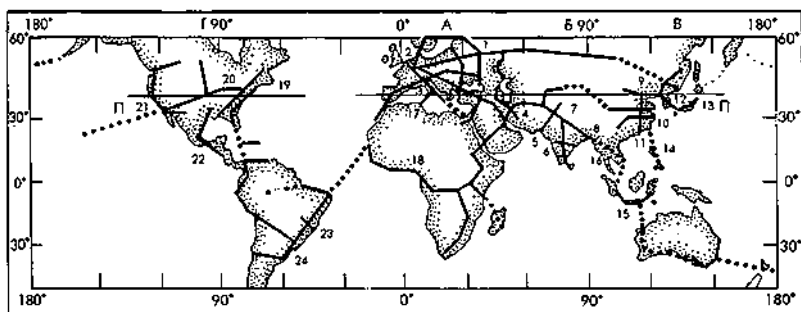


Рис. 4.11. Глобальный каркас расселения (Кудрявцев, 1989)

Морфология каркаса: П — главный пояс урбанизации; скопления: А — Европейское, Б — Южно-Азиатское, В — Восточно-Азиатское, Г — Северо-Американское; центры и ядра: 1 — Москва, 2 — Рейн-Рур — Лондон — Париж, 3 — Милан, 4 — Тегеран, 5 — Карачи, 6 — Бомбей, 7 — Дели, 8 — Калькутта, 9 — Пекин — Тяньцзинь, 10 — Шанхай, 11 — Кантон — Гонконг, 12 — Сеул, 13 — Токио — Осака — Кобе, 14 — Манила, 15 — Джакарта, 16 — Бангкок, 17 — Каир, 18 — Лагос, 19 — Нью-Йорк, 20 — Чикаго, 21 — Лос-Анджелес — Сан-Франциско, 22 — Мехико, 23 — Сан-Пауло — Рио-де-Жанейро, 24 — Буэнос-Айрес

Литература к главе 4

- Афанасьева и др. *Философия города* / Под ред. В.В. Афанасьевой. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2012.
- Вишневский А.Г. *Избранные демографические труды*: В 2 т. Т. 1. Демографическая теория и демографическая история. М.: Наука, 2005.
- Глобальные системы городов / Под ред. И.И. Абылгазиева, И.В. Ильина, А.В. Иванова. М.: МАКС-Пресс, 2012.
- Глобальные социоприродные процессы и системы: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011.
- Кропанева Е.А. *Архитектурная память города: использование фрактальных свойств архитектуры в преобразовании исторической среды* // Архитектон: известия вузов. 2007. № 18. Июль. Электронный ресурс: http://archvuz.ru/2007_22/22
- Ланто Г.М. *География городов*. М.: Владос, 1997.
- Манжуров И.Л. *Фрактальная модель распределения плотности поверхностных загрязнений*: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2002.
- Меерович М.Г., Коньшева Е.В., Хмельницкий Д.С. *Кладбище соцгородов: градостроительная политика в СССР 1928—1932 гг.* М.: Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 2011.
- Очерки по геоморфологии урбосферы / Отв. ред. Э.А. Лихачева, Д.А. Тимофеев. М.: Медиа-ПРЕСС, 2009.
- Пузаева Е.Г., Соловьев К.Н. *Самоорганизация социально-экономических систем*. Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2003.
- Сардар З., Абрамс И. *Хаос без аспирина*. Саранск, 2006.
- Семенов В.Т., Штомпель Н.Э. *Формирование устойчивого развития мегаполисов. Урбанистические аспекты*. Харьков, 2009.
- Тарасова Л.Г. *Градостроительное планирование и регулирование развития крупных городов с учетом действия процессов самоорганизации*: Автореф. дис. ... д-ра архитектуры. М., 2010.
- Туркина В.Г. *Город как самоорганизующаяся нелинейная структура* // Изв. Саратовского ун-та. Т. 8. Сер. Философия. Психология. Педагогика. 2008. Вып. 2. С. 62—66.
- Урсул А.Д., Урсул Т.А., Иванов А.В., Маликов А.Н. *Экология, безопасность, устойчивое развитие*. М.: Университетская книга, 2012.
- Фаттахов М.Р. *Агент-ориентированная модель социально-экономического развития мегаполисов (на примере города Москвы)*: Автореф. дис. ... канд. экон. наук. М., 2011.
- Флеров В.С. *«Города» и «Замки» Хазарского каганата. Археологическая реальность*. М., 2011.
- Чупрынин В.И. *Нелинейные явления в геосистемах* / Отв. ред. В.В. Суханов. М.: Наука, 2008.
- Шупер В.А. *Синергетический подход к российской урбанизации* // Синергетика: Будущее мира и России. М., 2008.
- Яшков И.А., Иванов А.В. *Танатологические и тафономические аспекты эволюции урбосистем (мысли, навеянные работами В.Г. Очева)* // Проблемы палеоэкологии и исторической геоэкологии: сборник научных трудов Всероссийской научной конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Виталия Георгиевича Очева. Саратов: Сарат. гос. тех. ун-т, 2012. С. 164—174.

- Яшков И.А., Иванов А.В., Кусков А.С., Баранов В.А.* Мертвые города в геоэкологическом и культурном пространстве / Под ред. А.В. Иванова. М.: Камертон, 2010.
- Яшков И.А., Сбитнев С.С., Гумилев Р.А.* Мертвые города Казахстана как элементы глобальной системы антиурбосферных структур // Глобалистика-2009: пути выхода из глобального кризиса и модели нового мироустройства: материалы Международного научного конгресса. Москва, МГУ, 20–23 мая 2009 г. Т. 2. М.: МАКС-Пресс, 2009. С. 276–279.
- Batty M.* Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals — Cambridge: The MIT Press, 2007.
- Batty M., Longley P.* Fractal Cities. N.Y.: Academic Press, 1994.
- Ivanov A.V., Sayamov Ju.N., Yashkov I.A.* Global challenges for cities and search of answers // 3G: Globalistics, Global Studies, Globalization Studies: Scientific Digest. Moscow: MAKS-Press, 2012. P. 26–32.



Часть II

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЩЕСТВЕ

ГЛОБАЛИЗАЦИЯ И ПРЕДПОСЫЛКИ ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проследим эволюцию определений глобализации, сравнивая разные источники, отдавая себе отчет в трудности выбора. В связи с этим уместной и поучительной представляется ассоциация по поводу определений. Академик Л.И. Мандельштам в своих знаменитых лекциях по теории колебаний писал следующее: «Совсем нелегко дать определение того, что составляет предмет теории колебаний. Планк как-то сказал, что правильная классификация — это уже высокий вид познания. Это несомненно: ведь правильно классифицировать — это значит давать довольно полные определения. И в данном случае разграничить, что такое колебания, также трудно, как определить, что такое лысый человек или что такое куча» (Мандельштам, 1972). Л.И. Мандельштам сравнивал определение с пеленанием младенца в колючую проволоку. Его слова в полной мере относятся и к определению глобалистики.

Этимологически термин «глобализация» восходит к латинскому слову *globus*, что значит шар. Словарь Вебстера впервые зафиксировал этот термин в 1951 г., раскрывая его как глобализирующий акт или процесс, а также как глобализированное состояние, особенно подчеркивая развитие и увеличение интеграции глобальной экономики, отмеченной свободной торговлей, свободным потоком капитала и подключением более дешевых иностранных рынков труда (<http://www.merriam-webster.com/dictionary/globalization>). В этом зафиксированном определении уже отразились два фактора, которые будут часто повторяться в последующих определениях: первое, не самое удачное для определения, — это тавтологичность, т.е. основное понятие объясняется через его производные, и второе — правомерно отмечается экономическая наполненность явления, которая и будет доминировать во многих других более поздних определениях.

Примерно то же мы видим и в определениях Оксфордского словаря более позднего периода (конца XX в.) (<http://www.>

enotes.com/-whencyclopedia/globalization), хотя он старается избежать тавтологичности и использует такие слова, как повсеместный, мировой и т.д. Тут появляются производные: глобальный, глобализировать, объясняется понятие «глобальная деревня» (понятие, которое первым ввел в 1964 г. МакЛуен, соотнося его с развитием электронных медиа и денежных переводов) — мир, который считается единой общностью, соединенной телекоммуникациями, что отражает новые реалии глобальности. Интересно, что примером для понятия «глобальный» в словаре послужило словосочетание «глобальный конфликт», что тоже является отражением действительности и умонастроения в конце XX столетия — планету все еще сотрясают конфликты, и они определяют умонастроения людей. Расшифровывается и понятие глобального предостережения, касающегося глобального потепления.

Приведем еще одно энциклопедическое определение из издания для детей «Аванта», чтобы продемонстрировать эволюцию осознания и, соответственно, отражения развития глобальных процессов, зафиксированных на уровне справочников разных стран. Оно отмечает объективность рассматриваемого явления, его широкий смысл в становлении единства человечества и рост числа глобальных проблем. Далее следуют очень простые, но значимые слова: «Ее нельзя отменить». А также говорится: «Глобализация — процесс быстрого формирования мирового финансово-информационного пространства на основе компьютерных технологий, слияние национальных экономик в единую общемировую систему» (Энциклопедия для детей «Аванта», 2003). Здесь акцентируется понятие скорости, с которой наращиваются глобальные процессы различного наполнения. Общественность же обеспокоена прежде всего процессами в их отрицательном наполнении, что находит яркое отражение в прессе, создании различных организаций в защиту окружающей среды, мира на земле и т.д.

Малькольм Ватерз в своей книге, посвященной ключевым идеям глобализации, отметил первое или одно из первых употреблений этого понятия в прессе. В апреле 1959 г. журнал *The Economist* писал, что итальянская *globalized quota* на импорт машин возросла (Waters, 2001). И вот с начала 1960-х гг. на мир обрушился поток таких слов, как глобальность, глобализация, глобализировать, глобальный и другие производные. Считается, что термин «глобализация» в его современном значении был впервые употреблен и научно обоснован профессором социологии Роландом Робертсо-

ном в 1982 г. И уже по этому пункту возникают разногласия, основывающиеся как на различном временном определении термина, так и на самом его толковании.

Сегодня, в начале XXI в., термин продолжает быть одним из самых распространенных и часто употребляемых и в научной литературе, и в средствах массовой информации, и в обыденной жизни. Но, по-видимому, научное осмысление не достигло того уровня, когда появляются четкие дефиниции. Еще одна причина, затрудняющая моноопределение глобализации, — это разнообразие подходов к этому явлению. Ведь проблемами глобализации озадачены и экономисты, и экологи, и демографы, и политологи, и медики, и социологи, и физики, и этот список можно продолжать и далее. Каждая из отраслей знания подходит к понятию глобализации со своих позиций, что отражается и в попытках его определения. Таким образом, вопрос создания единой дефиниции для такого объемного понятия остается открытым. Затрудняет фиксирование определения и тот факт, что сам объект исследования находится в постоянном и ускоряющемся развитии.

Термин «глобализация» носит обобщающий характер, объединяя множество более узких конкретных значений и смысловых оттенков. Сама этимология слова, понимаемая как нечто объединенное, совокупное, целостное, всеобщее, всемирное, часто кладется в основу его понимания.

Так, Википедия дает следующее определение понятия глобализации: «Глобализация — процесс всемирной экономической, политической и культурной интеграции и унификации. Основным следствием этого является мировое разделение труда, миграция в масштабах всей планеты капитала, человеческих и производственных ресурсов, стандартизация законодательства, экономических и технологических процессов, а также сближение и слияние культур разных стран. Это объективный процесс, который носит системный характер, то есть охватывает все сферы жизни общества. В результате глобализации мир становится более связанным и более зависимым от всех его субъектов. Происходит как увеличение количества общих для групп государств проблем, так и расширение числа и типов интегрирующихся субъектов». Спорным в этом определении является термин «унификация». Уже на современном этапе можно говорить о том, что глобализация по крайней мере не препятствует разнообразию эволюционных процессов в природе и человеческом обществе. Э. Азроянц подчерки-

вает, что «процесс глобализации нужно рассматривать не как путь к достижению гомогенности, а как важнейший источник разнообразия — собирание в целое разных. При этом разнообразие — не тенденция, а результат, определяющий жизнеспособность системы» (Азроянц, 2002).

Энциклопедические определения интересны тем, что они пытаются преодолеть узконаправленный подход, свойственный какому-то отдельному научному направлению, хотя мы постараемся представить и их. Так, данное определение подчеркивает три основных поля, в которых наиболее ярко происходят процессы глобализации — это экономика, политика и культура.

Эти три основные сферы человеческой деятельности — экономику, политику и культуру — одним из первых в качестве плацдарма для разворачивания глобальных процессов стал рассматривать Р. Робертсон, по праву считающийся пионером среди социологов, уделивших пристальное внимание процессам глобализации и созданию концепции глобализации. Его определение глобализации, относящееся к концу XX в., гласит: «Глобализация как концепция относится как к сжатию мира, так и к интенсификации осознания мира как целостности... оба конкретизируют глобальную взаимосвязанность и осознание глобального целого» (Robertson, 1992).

Необходимо отметить, что ряд исследователей, включая и Робертсона (И. Валлерстайн, Э. Гидденс, М. Вотерс, Г.Г. Дилигенский, Ю.А. Красин и др.), считают, что процессы глобализации идут из глубины веков, и сегодня мы видим некий результат такого развития. Другие придерживаются противоположной точки зрения на происхождение и развитие глобализации, относя ее к современным процессам. Так, антрополог Питер Уорсли говорит, что вплоть до наших дней не существовало человеческого общества как целого, имея в виду, что лишь с развитием новых технологий стало возможным говорить о формировании социальных связей, охвативших всю планету. Схожей точки зрения придерживается и А.Б. Вебер. Описывая глобальные реалии сегодняшнего дня, нельзя забывать о том, что «мир есть единое глобальное пространство и его архитектура представлена сложно связанными между собой функциональными подпространствами, в которых актуализируется все многообразие человеческой деятельности» (Вебер, 2002).

По-видимому, это опять-таки вопрос определения: что считать глобальными процессами, а что локальными и какое воздействие

они оказывают на развитие мировой цивилизации. Одной из возможностей решения этих вопросов является подход к ним с точки зрения нелинейной динамики, что и будет показано в книге далее. Бесспорным является тот факт, что географические открытия, налаживание торговых отношений да и подобие чековых денежных расчетов, заимствованное у каббалистов тамплиерами и привнесенное ими в Европу, и многое другое, происходившее на Земле со времен древних римлян и до наших дней, способствовали тому самому сжатию мира, о котором пишет Робертсон. Дело лишь в том, что в XX в. эти процессы приобрели качественно новый характер, достигли нового этапа интеграции. Радикально изменилось и их воздействие на окружающую действительность, под их влиянием стали меняться и преобразовываться качество и стиль жизни человека в глобальном масштабе. Глобальные процессы проникли практически во все сферы жизни общества и прежде всего в экономическую, политическую и культурную. Вот лишь один из примеров: изменение ритма жизни человечества в сторону его ускорения. Никогда ранее время так часто не выступало измерением пространства, как это произошло с появлением новых транспортных и электронных технологий.

Одним из первых, кто ввел в обсуждение глобализации связку время — пространство, был Э. Гидденс. Он также подчеркивает, что термин «глобализация» применяется слишком универсально и прежде всего для обозначения процессов роста мирового единства. Говоря о том, что глобализацию социальных процессов «следует понимать как преобразование пространства и времени современного существования», он далее ставит во главу угла воздействие процессов глобализации на повседневную жизнь, указывает на их неравномерный, иногда фрагментарный характер. Он пишет: «...наша жизнь все в большей степени испытывает на себе влияние действий и событий, происходящих достаточно далеко от той социальной реальности, в которой протекает наша повседневная деятельность» (Гидденс, 1999). Гидденс рассматривает взаимодействие локального и глобального в развитии процессов глобализации. Одно из его определений глобализации — это «повсеместная всемирная интенсификация социальных отношений, которые соединяют отдаленные районы таким образом, что местные происшествия формируются событиями, которые произошли за много миль, и наоборот. Это диалектический процесс, потому что такие локальные происшествия могут двигаться в любом ви-

димом направлении от очень удаленных связей, которые их формируют. Локальные трансформации в такой же степени являются частью глобализации, как и горизонтальное расширение социальных связей во времени и пространстве» (Giddens, 2003).

В начале XXI в. в Москве были изданы две фундаментальные книги, посвященные вопросам глобализации: «Глобалистика. Энциклопедия» (2003) и «Глобалистика. Международный междисциплинарный энциклопедический словарь» (2006). Позже вышел справочник «Глобалистика: персоналии, организации, издания» (2012). Мы постарались выбрать из них основные определения этого явления и приводим их здесь.

«Глобализация — процесс универсализации, становления единых для всей планеты Земля структур, связей, отношений в различных сферах жизни общества. Феномен глобализации, воспринимаемый как объективная реальность, заявляет о себе замкнутостью пространства, единым мировым хозяйством, всеобщей экологической взаимосвязанностью, глобальными коммуникациями и др.» (Глобалистика. Международный междисциплинарный энциклопедический словарь, 2006, Уткин).

«...Процесс, предполагающий реорганизацию производства в пространстве, взаимопроникновение промышленных предприятий через государственные границы, расширение финансовых рынков, увеличение доли иностранных прямых инвестиций в развивающиеся экономики, расширение глобального рынка труда, распространение технологий, международные коммуникации и всемирную культурную интеграцию» (Глобалистика. Международный междисциплинарный энциклопедический словарь, 2006, Келбесса).

«Глобализация — это новый всемирный процесс социальной трансформации; ...а модернизация отдельных сообществ — ее следствие» (Глобалистика. Международный междисциплинарный энциклопедический словарь, 2006, Федотова).

«Глобализация — слияние национальных экономик в единую, общемировую систему, основанную на быстром перемещении капитала, новой информационной открытости мира, технологической революции, приверженности развитых индустриальных стран либерализации движения товаров и капитала, коммуникационном сближении, планетарной научной революции; для нее характерны межнациональные социальные движения, новые виды транспорта, телекоммуникационные технологии, интерна-

циональная система образования» (Глобалистика. Энциклопедия, 2003, Уткин).

«Глобализация — это процесс, определяемый рыночными, а не государственными силами» (Глобалистика. Энциклопедия, 2003, Уткин).

«Глобализация — процесс стремительного формирования единого общемирового пространства на базе новых, преимущественно компьютерных технологий. В этом ее отличие от интеграции, высшей стадией которой она является» (Глобалистика. Энциклопедия, 2003, Деягин).

При определении понятия глобализации существует одна опасность — чрезмерная генерализация, о чем предупреждает А.В. Вебер. Далее он говорит, что «глобализация — очень широкое понятие, позволяющее подводить под него разные явления, имеющие то общее, что они достигают глобальных масштабов. Некоторые даже считают, что надо говорить не об одной, а о нескольких глобализациях — экономической, политической, глобализации информации, потребительских образцов (“макдональдизация”), глобализации экологических угроз, наркобизнеса, преступности, демографической глобализации. Причем эти разные процессы имеют разные масштабы и векторы и развиваются с разной скоростью» (Вебер, 2002).

Примеры определений можно было бы продолжать почти до бесконечности. Кратко основные идеи можно представить в следующей схеме:



В начале XXI в. Э. Гидденс в своей книге «Убегающий мир» отметил, что термин «глобализация» сам по себе стал глобализованным, хотя до конца 80-х гг. XX в. употреблялся более чем скромно (Giddens, 2003). В электронной версии Routledge Dictionary (<http://www.bookgras.com/Globalization>), наряду с обстоятельно развернутыми определениями, представляются и такие: «Глобализация — это ужасный термин, в том смысле, что он пытается быть всеобъемлющим для всего; он употребляется очень широко и туманно» (М. Хардт). Или: «Глобализация чего-то плохого делает его еще хуже. Но глобализация хорошего обычно ведет к хорошему» (Р. Столлман), с чем трудно не согласиться. М. Вотерс вообще предположил, что глобализация может лечь в основу концепции, выступить в качестве ключевой идеи, которая поможет осознать переход человеческого общества в третье тысячелетие. В начале же этого тысячелетия уже заговорили о пост-глобализации.

По-видимому, представленные определения уже в достаточной мере «слепили», хоть и не вполне целостную, но все же картину и создали общее представление о феномене глобализации. В большинстве определений глобализация характеризуется как процесс, хотя были и другие суждения по этому поводу. Так У. Бек, рассуждая на эту тему, отмечал процессуальность глобализации и в то же время допускал возможность рассматривать ее и как результат (Бек, 2004). Но результат обычно проявляется в своей фиксированной форме, а большая часть исследователей подчеркивает постоянное изменение, наращивание скорости в развитии процессов глобализации, хотя, конечно, можно говорить о промежуточном результате как итоге определенного воздействия. На сегодняшний день глобализация предстает как объективное явление, реализующееся в масштабе всей планеты в своем постоянном развитии. Наполнением этого всемирного феномена являются глобальные процессы, пронизывающие все сферы человеческого существования и во многом его определяющие. Несмотря на достаточно богатый опыт исследования глобальных процессов и феномена глобализации, трудно сказать, что человечеством достигнуто полное понимание этих явлений и, главное, их возможных последствий.

Осмысление глобализации продолжается, и так как само явление с развитием не становится проще, множатся и подходы к его определению. Вот еще несколько примеров концептуального подхода к современному миру, высказанных в начале второго десятилетия XXI в. «Глобализация — это сложный многофакторный

процесс, определяемый системой взаимодействий в многоуровневом комплексе отношений «природа — человек — общество» (Арзоянц, 2002). А.Н. Чумаков определяет глобализацию как «многовековой естественно разворачивающийся процесс становления единых для всей планеты биосоциальных структур, связей и отношений» (Чумаков, 2009). Авторы книги «Глобализация в перспективе устойчивого развития» (Бабурин, Мунтян, Урсул, 2011), отмечая многоуровненность, многогранность, многоликость и историческую перспективность, предлагают сразу семь определений глобализации, среди которых наиболее обобщающее звучит следующим образом: «глобализация — это нелинейный, прерывистый, пульсирующий, необратимый в принципе и в целом и обратимый в своих отдельных проявлениях диалектический процесс возрастания мироцелостности на этапе транснационализации жизни всего человечества». Представляется, что именно это определение наиболее созвучно данной книге.

Глобализация — это естественный процесс, не нарушающий непосредственного хода развития человечества. Человечество связано, объединено средой обитания — планетой Земля, которая предоставляет ему жизненное пространство и обеспечивает природными ресурсами. Все остальное — это человеческий потенциал, который во многом определяет процессы глобализации. Глобализация — это рукотворный процесс, по крайней мере в его инициации (за исключением природных явлений), центром которого является человек. Этот процесс идет из глубины веков, с тех пор, как человек осознал себя жителем Земли и поинтересовался тем, что происходит вокруг. С расширением круга этого интереса постепенно устанавливались объединяющие связи, т.е. именно человек ответствен за порождение глобальных процессов того или иного толка. Сегодня глобализация характеризуется прежде всего нарастающими темпами и качественным изменением процессов, ее составляющих, но в центре продолжает оставаться человек и как творец, и как субъект, испытывающий результат на себе, причем в последнее десятилетие его роль заметно усиливается как в качественном, так и количественном отношении.

Процессы глобализации изучались и изучаются с различных научных позиций, и многими исследователями подчеркивается значимость человеческого фактора в этих процессах. Вот как обосновал психологическую составляющую Карл Густав Юнг в своей работе «Нераскрытая самость», впервые опубликованной в 1957 г. Рассматривая религиозное разнообразие в мире, он говорил:

«И все же сегодня мы живем в едином мире, в котором расстояния уже измеряются часами, а не неделями и месяцами. ... Уже началось взаимопроникновение идеологических сфер, и, возможно, не за горами то время, когда остро встанет вопрос взаимопонимания. А оно абсолютно невозможно без глубокого постижения точки зрения другого человека. Необходимое для этого озарение будет иметь последствия для обеих сторон. История обязательно пройдет мимо тех, кто считает своим призванием сопротивление этому неизбежному развитию ситуации, каким бы желанным и психологически необходимым ни было сохранение всего существенного и хорошего, что есть в нашей традиции. Несмотря на все различия, единение человечества просто неизбежно» (Юнг, 2010).

Но роль человеческого фактора была различна на разных этапах развития глобализации. Если на ранних этапах на первый план выдвигались отдельные яркие личности: правители, воины-полководцы, великие первооткрыватели новых земель, в дальнейшем — великие ученые, то с развитием и ускорением глобализации все большее количество людей стали принимать непосредственное участие в судьбах мира. И главное: для этого появляется все больше технических возможностей, меняющих мир и роль отдельного человека в нем. В связи с этим представляется интересной классификация этапов глобализации, предложенная Томасом Фридманом в его книге «Плоский мир: Краткая история XXI века». Фридман выделяет «три великих эпохи глобализации. Первая продолжалась с 1492 года — путешествия Колумба, положившего начало обмену между Старым и Новым Светом, — приблизительно до 1800-го» (Фридман, 2007).

Как и многие исследователи, Фридман подчеркивает изменение размерности мира для человека. С географическими открытиями и прокладыванием новых торговых путей «мир перестал быть большим и стал средним». Но уже на ранних стадиях объединения мира для людей были важны не только обмен товарами, не только «Чем вы, гости, торг ведете и куда теперь плывете?», а важными вопросами были «Ой вы, гости-господа, долго ль ездили? Куда? Ладно ль за морем, иль худо? И какое в свете чудо?» С зарождением торгово-экономических отношений реализовалась значимая для человечества информативная функция, которая впоследствии будет играть центральную ведущую роль в объединении человечества. Так и Великий шелковый путь представляется информационной ниточкой глобализации, которая через столетия вплелась во всемирную паутину.

Вторую великую эпоху, или, как ее называет Фридман, «Глобализация 2.0, продолжалась где-то с 1800 по 2000 год, с перерывами на Великую депрессию и две мировые войны. В этот период мир перестал быть средним и стал маленьким» (Фридман, 2007). В этот период зарождаются и в дальнейшем начинают играть одну из ключевых ролей транснациональные корпорации. Новые виды более скоростного транспорта сократили расстояния, сделав любую точку мира доступной. XIX и XX века ознаменовались и созданием принципиально новых видов связи: телеграф, телефон, а затем и спутниковая и волоконно-оптическая, а также зарождение Всемирной паутины заложили основу создания единого информационного пространства Земли.

Начало нового, XXI века Фридман считает и началом эпохи Глобализации 3.0. «Глобализация 3.0 сокращает мир до предела: мир перестает быть маленьким и становится крошечным, и в то же время она выравнивает всемирное игровое поле. И если движущей силой Глобализации 1.0 были страны, Глобализации 2.0 — компании, движущей силой Глобализации 3.0 — что и является ее уникальной особенностью — становится сформировавшийся потенциал для глобального сотрудничества и конкуренции, который теперь доступен отдельной личности» (Фридман, 2007).

Каждая эпоха глобализации имеет свои политические характеристики, т.е. с одной стороны, зависит от политической картины мира, с другой — определяет ее. С развитием и укреплением государственности более сильные государства закладывали начала объединительных мировых процессов с позиции силы. Это выражалось в захватнических устремлениях, в борьбе за природные и людские ресурсы. Политическую карту мира определяли сильные правители более развитых и агрессивных государств.

В дальнейшем экспансия обогатилась и другими факторами мирового политического влияния. Прежде всего, необходимо отметить развитие науки, предоставившей возможности укрепления государства в таком его воплощении, как военный, оборонительные и наступательные потенциалы. Научные достижения играют все более возрастающую роль в объединении людей земного шара, что не может не отражаться и на политическом мировом раскладе. Возникающие глобальные тенденции трудно причислить к какой-то одной зоне влияния, они вплетаются в человеческую жизнь, преобразуя ее, и скорости этого преобразования возрастают. Так, научные разработки, зародившиеся в военно-промышленном комплексе, повлияли прежде всего на степень открытости, доступности

сти и скорости обмена информацией, предоставив человечеству мировую информационную сеть. Вырос потенциал политической активности не только государств, политических деятелей, но и отдельного человека, увеличились его возможности, реализация которых зависит от качества самой личности.

С увеличением глобальных тенденций и их осознанием на политическую арену выходят новые действующие лица. У людей возникло понимание невозможности противостоять вызовам развивающегося мира поодиночке. Общие цели стали основой для объединения людей в различные сообщества как на локальном, так и международном уровне. Первые международные организации стали возникать с середины XIX в. Датой рождения международных организаций можно считать 1874 год, когда появилась одна из первых межгосударственных организаций, а именно Всемирный почтовый союз, работающий и поныне. Затем возникли международные союзы электросвязи, железнодорожного транспорта и другие, создаваемые не только на профессиональной основе. К началу Первой мировой войны насчитывалось уже более 500 различных международных организаций. Они были представлены широким членством и провозглашали своей задачей усовершенствование в той или иной степени мироустройства, решение проблем на основе новых принципов взаимодействия.

Значимым политическим событием стало создание в 1919 г. Лиги Наций. Лиге были делегированы новые функции, присущие ранее только отдельным государствам. Теперь 58 государств — участников совместно решали вопросы обеспечения мировой безопасности, урегулирования споров между государствами дипломатическими методами, а также улучшения качества жизни на всей планете. Безусловно, не все организации успешны и долговечны, время и стремительный ход событий вносят свои коррективы, но сам процесс продолжается и стремительно развивается. Во втором тысячелетии насчитывается уже более 23 тыс. международных организаций, 3 тыс. из которых являются межправительственными и 20 — неправительственными. Их организация, членство, устав или его отсутствие, сферы влияния, качественный и количественный состав, открытость для новых членов или имеющиеся ограничения, а также цели и задачи функционирования представляют собой самую широкую вариативность, отражая потребности меняющегося мира и возрастающую активность в мироустройстве не только отдельных государств, но и отдельных

граждан. Среди ведущих, наиболее дееспособных и оказывающих заметное влияние на мировое развитие назовем Всемирную торговую организацию, Международный валютный фонд, Парижский клуб, Совещание «Большой восьмерки».

Одной из самых влиятельных многочисленных универсальных, открытых для всех государств мира и объединяющих к 2011 г. 193 государства мира является Организация Объединенных Наций. Созданная в годы Второй мировой войны ООН продолжает быть активным и влиятельным актором в укреплении мира и безопасности, развитии сотрудничества между государствами, поднимая самые животрепещущие мировые вопросы.

Но в рамках данной книги представляется важным обратиться к другой международной организации, которая с первых дней существования провозгласила своей целью исследование глобальных процессов и поиски оптимальных путей развития человечества. Речь пойдет о Римском клубе.

В апреле 1968 г. итальянским менеджером Аурелио Печчеи был образован Римский клуб — событие, которое стало ключевым в развитии исследований глобальных процессов (www.clubofrome.org).

Аурелио Печчеи (*Aurelio Peccei*; 4 июля 1908, Турин — 14 марта 1984, Рим) — итальянский ученый, менеджер и общественный деятель, основатель и президент Римского клуба, исследовавшего глобальные модели развития человечества. А. Печчеи — автор книг и документов по глобальной проблематике и концепции устойчивого развития. Был вице-президентом компании Olivetti, членом административного совета компании «Фиат». Автор нескольких прогностических и научно-популярных книг, переведенных на многие как европейские, так и азиатские языки (Википедия).



Аурелио Печчеи совместно с генеральным директором по вопросам науки ОЭСР (Организация по экономическому сотрудничеству и развитию, Париж) профессором физической химии Александром Кингом пригласил в Рим около 30 европейских ученых — естественников, социологов и экономистов.

Таким образом, была создана международная неправительственная организация, объединяющая в своих рядах ученых, об-

ественных и политических деятелей разных стран мира. Юридически Римский клуб зарегистрирован в Швейцарии. Члены клуба выдвинули две основные цели своей деятельности. Первая — это осознание трудностей, с которыми столкнулось человечество, вторая — поиск путей воздействия на общественное сознание, ведущее к исправлению негативных ситуаций. Нам же необходимо подчеркнуть то огромное значение, которое имели первые доклады Римского клуба для развития глобальных исследований и, конкретнее, для становления и развития глобального моделирования. Далее мы расскажем о наиболее интересных проектах Римского клуба от самых первых, ошеломивших общественность и ученое сообщество, до проектов сегодняшнего дня, проследим динамику их развития и преобразования.

Первый проект доклада Римскому клубу под названием «Поиски конструктивного ответа на возросшую сложность и неопределенность мирового развития» был предложен Хасаном Озбекханом, турком по происхождению, философом, специалистом в области кибернетики и планирования, возглавлявшим один из калифорнийских мозговых центров. Идея его доклада состояла в «разработке первоначальной, грубой модели или нескольких моделей, — которая в общих чертах отражала бы динамику мирового развития в надежде, что она позволит выявить наиболее важные компоненты системы и самые опасные (с точки зрения будущего) взаимосвязи между ними» (Печчеи, 1985). Однако из-за сложности проекта и нехватки времени для его разработки лидеры Клуба отказались от его реализации.

Создание Клуба, дальнейшее развитие его идей, а также научные достижения середины XX столетия положили начало глобальному моделированию перспектив выживания человечества на основе использования вычислительной техники. Участники этих исследований и другие футурологи разделились на два основных направления: одни из них стали развивать так называемые неомальтузианские идеи «социального пессимизма» (Дж. Форрестер, Д. Медоуз, Р. Хейлбронер), а другие пытались доказать возможность избежать катастрофу с помощью «оптимизации» (О. Тоффлер, М. Месарович, Э. Ласло, Э. Пестель). Но именно их объединенные усилия стали той бифуркационной точкой, которая определила осознание глобальных опасностей, возникших в результате человеческого развития. Они были первыми, кто столь убедительно показал и доказал взаимосвязь и взаимозависимость

глобальных процессов и их возможные пагубные последствия для всего человеческого сообщества.

Дж. Форрестер — профессор прикладной математики и кибернетики Массачусетского технологического университета — был первым, кто представил математическую модель под эгидой Римского клуба, имитирующую сложившуюся ситуацию в мире (Forrestor, 1971), (Форрестер, 2003). Целью такого моделирования было проследить развитие кризисных глобальных процессов в их взаимодействии с обществом, т.е. в центре внимания был человек и его среда обитания. Первую модель назвали «Мир-1». Форрестору понадобилось всего четыре недели, чтобы создать эту модель, в которую входило порядка 40 нелинейных уравнений. Уравнения описывали взаимосвязь пяти параметров, а именно демографический, капиталовложения, использование невозобновляемых ресурсов, загрязнение окружающей среды и производство продовольствия. Модель считалась достаточно простой и грубой, но ее предсказания стали ошеломительными: мир движется к катастрофе. Вскоре Дж. Форрестер усовершенствовал свою модель, назвав ее «Мир-2». Математическое изложение модели Дж. Форрестера и ее модификаций дано в главе 6. В главах 7 и 8 приведены также эталонные модели глобальных процессов: логистическое уравнение и уравнение Лотки-Вольтерры и сходные с ними.

Интересно высказывание выдающегося российского ученого академика АН СССР Н.Н. Моисеева, которым он делится в своей книге свободных размышлений «Как далеко до завтрашнего дня»: «Наиболее важной из известных мне была работа профессора МИТ Джея Форрестера “Мировая динамика”. Эта работа была действительно пионерской. Автор сделал попытку описать основные процессы экономики, демографии, роста загрязнения и их взаимообусловленность в планетарном масштабе, описать с помощью всего лишь пяти переменных. Он разработал специальный язык описания, так называемый “Динамо”, способы программирования и анализа получаемых результатов. На меня эта работа произвела большое впечатление. Не своей научностью, большинство используемых зависимостей брались “с потолка” и не выдерживали даже благожелательной критики. И не своими методами, которые очень напоминали методы плюс-минус факторов, использовавшихся инженерами для расчета электрических схем еще в двадцатых годах. Особое впечатление на меня произвела смелость

автора, поднявшего руку на проблему целостного описания биосферных процессов, включающих и активную деятельность человека. Эта работа перекликалась с теми разговорами, которые мы вели с Тимофеевым-Ресовским и была своеобразным ответом на мои сомнения. Я утвердился в необходимости подобной работы, хотя и считал, что она должна быть проведена совсем по иному» (http://www.ccas.ru/manbios/kak_daleko_r.html). И действительно, Моисеев и его группа блестяще справились с созданием еще одной глобальной модели, которая в свою очередь потрясла мир.

Дальнейшее развитие математических глобальных моделей принадлежит Деннису Л. Медоузу и его группе, который в 1972 г. выпустил книгу «Пределы роста. Доклад Римскому клубу» (Meadows, Meadows, Randers, and Behrens, 1972). В этой части книги мы представим два портрета из авторской группы, а с остальными портретное знакомство произойдет в главе 6. Итак, Донелла Медоуз, выдающаяся женщина, внесшая весомый вклад в исследования Римского клуба, она трижды участвовала в написании фундаментальных докладов Римскому клубу, и Йорген Рандерз. Он входил



Донелла (Дана) Медоуз (13 марта, 1941 Иллинойс, США — 20 февраля, 2001, Ганновер) — американский исследователь — специалист по охране окружающей среды, учитель и писатель. Получила мировую известность как соавтор знаменитой книги «Пределы роста», написанной по заказу Римского клуба (Википедия)



Йорген Рандерз (родился в 1945 г.) — норвежский исследователь, профессор, сфера научных интересов — климатология, разработка сценариев развития, мировые процессы, народонаселение Земли (Википедия)

в исследовательскую группу вместе с Донеллой и интересен прежде всего тем, что и через 40 лет, уже в 2012 г. представил новый доклад Римскому клубу — на сегодняшний день последний, где обрисовал дальнейшие возможные пути развития Земли.

Но еще в 1971 г. в Венеции была организована первая конференция по глобальным проблемам. Вот что о ней написал Н.Н. Моисеев: «Ее основой, если угодно, осью был доклад ученика Форрестера, Денниса Медоуза “Пределы роста”. Книга, изданная после его доклада, сделалась бестселлером, была переведена на множество языков и издана фантастическим тиражом (Медоуз, Медоуз и др., 1991). По существу вся конференция была посвящена ее изложению, демонстрации техники языка “Динамо” и машинным экспериментам с предлагаемыми моделями.

Я бы сказал, что Медоуз произвел “оглушающий” эффект — своеобразный концерт группы “хеви металл” в чинном научном обществе. Все выступавшие его хвалили и пели дифирамбы ему, его учителю и его коллегам. Единственным диссонирующим выступлением было мое» (http://www.ccas.ru/manbios/kak_daleko_g.html). Н.Н. Моисеев относил Медоуза к информаторам, а не ученым, и не считал, что ему удалось действительно описать то, что происходит на планете, и до конца исследовать проблему. «На самом деле проблема бесконечно сложнее и труднее, чем это представлялось авторам работ по моделированию с использованием форрестеровской техники. И без настоящего описания процессов взаимодействия в природе и с природой обойтись не удастся», — отмечал Моисеев (http://www.ccas.ru/manbios/kak_daleko_g.html). Моисеев предлагал качественно новый подход к решению глобальных проблем — построить компьютерную систему, имитирующую взаимодействие океана, атмосферы и биоты. При этом необходимо учитывать результаты деятельности человека, причем в различных областях, и задавать их в качестве тех или иных сценариев. Задача поистине глобальная!

1-го марта 2012 г. было торжественно отмечено сорокалетие выхода книги «Пределы роста», которая была распродана более чем 10-миллионным тиражом на 37 языках мира. Этому событию был посвящен симпозиум, организованный Римским клубом и Смитсоновским институтом (США), озаглавленный «Перспективы пределов роста: Проблемы строительства устойчивой планеты». Симпозиум состоял из двух сессий: на утренней сессии с презентацией, сосредоточенной на уроках пределов роста, выступали

двое из авторов книги — Деннис Медоуз и Йорген Рандерз. Затем последовало выступление президента Института политики Земли и автора «Мир на грани: Как предотвратить экологический и экономический коллапс» Лестора Брауна. Вечерняя сессия была посвящена изменению климата и зависящей от этого биодиверсификации, а также социальным вызовам, стоящим перед человечеством сегодня. Закончился симпозиум дискуссией по поводу устойчивого развития (www.clubofrome.org).

Но вернемся к историческому ходу событий в Римском клубе. В 1992 г. вышла новая книга Медоуза «За пределами роста» (Meadows, Meadows, and Randers, 1992) и, наконец, в 2000 г. — книга «Пределы роста. 30 лет спустя» (Meadows, Randers, and Meadows, 2000), в которой использовалась модель «Мир-3». Авторы третьей книги писали, что для понимания основных выводов совсем не обязательно вводить модель «Мир-3» в компьютер и детально изучать ее. Самые значимые выводы о вероятности глобальной катастрофы вытекают из простого понимания динамики поведения глобальной системы, которая определяется тремя ключевыми факторами: существованием пределов разрушения, постоянным стремлением к росту, а также запаздыванием между приближением к пределу и реакцией на это общества. На этих причинно-следственных связях и основана модель «Мир-3». Поскольку причинно-следственные связи в мире никто не отрицал, то вполне вероятно, что реальный мир идет по пути, который описан в сценариях пределов роста.

Модели Форрестора и Медоуза предсказывают неизбежность кризиса из-за истощения ресурсов и роста загрязнения, если сохранить современные тенденции и не принимать никаких мер к предотвращению кризиса. Кризис же приведет к резкому падению промышленного производства, сокращению вложений в сельское хозяйство. Развитие кризиса ведет к уменьшению производства продуктов питания и ухудшению медицинского обслуживания, что в свою очередь вызывает рост заболеваемости и смертности, ведущий к сокращению численности населения. Результаты расчетов Форрестера и Медоуза показали, что для предотвращения катастрофы необходимо уменьшить потребление ресурсов Земли примерно в восемь раз.

Исследования Римского клуба привлекли огромное внимание к глобальным проблемам, пожалуй, впервые доказательно и компетентно показав их реальную угрозу. В этом состоит огромная

заслуга Римского клуба и его членов, хотя можно по-разному относиться к тем рекомендациям, которые последовали от ученых, в частности, они призывали ограничить потребление ресурсов Земли, снизить рост промышленного производства, прекратить рост численности населения земного шара и таким образом достичь «глобального равновесия». Одним из факторов предотвращения катастрофы авторы считали просветительскую деятельность. Заметим, что в одну из последних модификаций моделей Форрестора предлагается включить в качестве учитываемого параметра уровень образования.

Первые модели Римского клуба вызвали небывалый отклик, естественно включавший и жесткую критику. Клуб же продолжал свою деятельность и предложил миру новое исследование, более направленное на преодоление угроз глобальных процессов, нежели делающее акцент на самих угрозах. Проект так и назывался — «Стратегия выживания — Человечество на поворотной точке». Он был разработан в 1974 г. под руководством М. Месаровича и Э. Пестеля (Mesarovic, Pestel, 1974). Отличительной чертой этого проекта от предыдущих было то, что он включал большее количество факторов для анализа. Проект ставил задачу выявления процессов, способных препятствовать нормальному развитию, а также исследовал возможности локализации кризисов и пути их предотвращения. Авторы этого проекта предлагали модель мира, которая включала десять регионов, взаимодействующих между собой на экономическом (импорт-экспорт) и демографическом уровне (миграция населения).

Выводы, сделанные Месаровичем и Пестелем, также отличаются от выводов предыдущих проектов Римского клуба. Представляя мир как единую систему взаимосвязанных частей, они видели большую угрозу, заключающуюся в региональных катастрофах, серию коих предсказывали в ближайшем будущем. Концепции «глобального равновесия» Форрестора и Медоуза авторы этой модели противопоставили свою концепцию «ограниченного роста». Их концепция рассматривала мир как единую систему взаимосвязанных и взаимозависимых частей. Соответственно количественному недифференцированному экспоненциальному росту был противопоставлен рост, обеспечивавшийся структурной дифференциацией элементов системы с учетом взаимосвязи между этими элементами. Авторы отмечают взаимозависимость кризисных ситуаций, прослеживая взаимодействие изменений

одних параметров в определенных регионах с изменениями параметров в других регионах, например, возможное взаимодействие уровня питания в регионах Азии и Африки с ограничением роста материального потребления в развитых странах Запада.

Римский клуб также не мог обойти стороной и проблему экономического неравенства стран. В 1974 г. японская группа Римского клуба представила проект под названием «Глобальные ограничения. Новый взгляд на развитие» (Кава, Suzuki, 1973). Целью данного исследования явился поиск возможности уменьшения разницы в доходах на душу населения в развитых и развивающихся странах. Представленная модель, во-первых, предусматривала возможность управления, во-вторых, она описывает мир, разделенный на девять регионов. Выводы исследования таковы: развитые регионы должны оказывать безвозмездную помощь развивающимся регионам. Определен и размер этой помощи — около 1% своего ежегодного валового продукта, но помощь станет действенной и эффективной при условии изменения структуры экономики региона, которому помогают. Модель предлагала развитие сельского хозяйства в развивающихся регионах, а также перенос доли легкой промышленности из развитых регионов в развивающиеся с тем, чтобы первоначальный быстрый рост доли продукции сельского хозяйства сменился ростом доли продукции легкой промышленности.

Сложившееся мировое экономическое, научно-техническое и политическое неравенство между развитыми и развивающимися странами и вытекающие из этого неравенства глобальные риски продолжали правомерно оставаться в центре внимания Римского клуба. Под его эгидой в 1976 г. разработан новый проект с амбициозным названием «Изменение международного порядка». Руководил этим исследованием голландский ученый, лауреат Нобелевской премии Я. Тинберген (Tinbergen and others, 1976).



Ян Тинберген (нидерл. Jan Tinbergen; 12 апреля 1903, Гаага — 9 июня 1994, там же) — голландский экономист.

Нобелевскую премию 1969 г. Тинберген получил «За создание и применение динамических моделей к анализу экономических процессов».

Член-корреспондент Британской академии (1969).

Голландский ученый окончил Лейденский университет, доктор того же университета.

Работал в Нидерландской экономической школе (подразделение Роттердамского университета Эразма), директором Центрального бюро статистики (Гаага). Президент Эконометрического общества (1947) (Википедия).

Как и все проекты Римского клуба, этот также отмечен высоконравственными и гуманистическими целями достижения идеального состояния развития человечества, где уравниены права как самих стран, так и граждан внутри стран на основе общечеловеческих ценностей. В исследовании раскрывается одна из ведущих черт глобального мира — возрастающая взаимозависимость стран мира как глобальный процесс. Поэтому растущая диспропорция в развитии человечества, и прежде всего богатство одних и бедность других, становятся мировой угрозой. Авторы подчеркивают, что для развивающихся стран невозможно и недопустимо копирование пути развития современных потребительских обществ. Такое копирование приведет к еще большему усилению социальных контрастов, конфликтам с национальной культурой и потерям человеческих ресурсов. Цель данного исследования — выработка рекомендаций новых форм международного сотрудничества на экономическом, научно-техническом и политическом уровнях, обеспечивающих удовлетворение основных нужд населения Земли, и определение возможных потребностей будущего. Реализация этой задачи остается актуальной и по сей день.

Интересна динамика политики Римского клуба в выработке подходов к решению глобальных задач, стоящих перед человечеством: от грубой модели «Мир-1», представленной в 1971 г., до выработки конкретных программ, например, направленных на решение энергетических проблем в 2009 г. Эта динамика, а также убедительные результаты других научных групп в области глобального моделирования доказали действенность данного инструмента при правильно формулируемой задаче и соответствующем выборе параметров исследуемого глобального процесса. С развитием науки и прежде всего информационных технологий совершенствуется и процесс моделирования как инструмент познания мира. Хотя этот инструмент все еще демонстрирует ограниченные возможности на фоне все увеличивающегося разнообразия глобальных задач, целенаправленное и четко выверенное его использование весьма плодотворно, так как математические модели не только предупреждают об опасностях, но и помогают при выборе пути их преодоления.

Римский клуб продолжает свою деятельность, направленную на поиск решения глобальных проблем, и в XXI веке. Необходимо

отметить, что его деятельность изменилась как качественно, так и количественно. Исследовательская деятельность дополнилась реальными проектами, в которых участвуют специалисты и капиталы различных стран. Однако идеология клуба осталась прежней. Приведем несколько примеров проектов Римского клуба нового тысячелетия.

В 2003 г. им была основана международная организация под названием Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation (TREC), целью которой является решение энергетических проблем на мировом уровне. В состав TREC входят ученые и политики. Предлагаемая TREC концепция энергоснабжения поистине глобальна. Она предусматривает обеспечение энергией Европы, Северной Африки и ближнего Востока. Римский клуб, оставаясь верным своим принципам сохранения природной среды, положил в основу проекта использование солнечной энергии. Такой подход позволит получать электрический ток в больших количествах, достаточных даже для опреснения морской воды, т.е. решается еще одна глобальная проблема — нехватка пресной воды. Солнечная энергия вырабатывает электрический ток, не загрязняя атмосферу выбросами парниковых газов, что особенно важно для промышленных районов, и, наконец, она является альтернативой нефти и газу. Таким образом, новые научные технологии данного проекта решают сразу несколько глобальных проблем, что будет способствовать сохранению природы, улучшению экологической обстановки на планете и преодолению нехватки энергии.

Еще один очень важный аспект этого проекта — политический, объединяющий несколько стран и континентов для преодоления глобальных вызовов XXI века. Глобальные проблемы требуют глобального решения. Программа немецкого отделения Римского клуба, которая получила название Desertec, объединив два английских слова «пустыня» и «техника», предусматривает строительство обширной сети небольших солнечных электростанций мощностью от 50 до 200 МВт. Они будут располагаться в пустынной местности от Марокко до Саудовской Аравии. Для воплощения этой программы 12 крупных европейских концернов объявили о создании консорциума, к которому собираются примкнуть и партнеры из стран Северной Африки. Еще раз стоит подчеркнуть плодотворность объединения усилий ученых, политиков, экономистов, технологов для решения, казалось бы, одной проблемы — энергообеспечения. К возможности решения вышеуказанных эко-

логических проблем добавим еще создание новых рабочих мест, повышение жизненного уровня в странах Северной Африки и Ближнего Востока, снижение террористической опасности. Руководители ТРЕС уверены, что развитие солнечной энергетики должно сблизить арабский мир и Европу, укрепить отношения между ними. «Энергия — неотъемлемый фундамент социально-экономического развития и в то же время существенный вклад в мир между народами», — отметил один из президентов Римского клуба, иорданский принц Хасан ибн Татал» (Волков, 2009).

В начале второго десятилетия XXI века Римский клуб объединяет более 30 стран и может включать около 100 действительных членов. Отмечая положительный потенциал развития некоторых глобальных процессов в экономике, а также инновационных преобразований, Римский клуб сосредоточивает свое внимание на выработке новых стратегий, призванных решить такие глобальные проблемы, как улучшение жизненных условий и возможностей для все возрастающего населения земли. Для того чтобы человечество преодолело надвигающиеся трудности, необходимо сформировать новое видение, выработать новый путь мирового развития. В мае 2008 г. Римский клуб предложил трехлетнюю программу, рассчитанную до 2012 г., которая называется «Новый путь мирового развития» (A New Path for World Development), предназначенную для достижения лучшего понимания тех сложных глобальных вызовов, с которыми сталкивается современный мир. Такое осознание должно заложить основу для определенных действий, направленных на улучшение перспектив мирного прогресса. Отличие этой программы от других заключается в том, что для ее выполнения призываются не только эксперты, ученые или политики, от которых зависят решения, но и простые граждане Земли, т.е. программа предусматривает привлечение общественности посредством различных каналов. Она так и называется — открытая программа (open-source programme).

Новый путь мирового развития — концептуальная основа для пяти взаимосвязанных направлений решения мировых проблем. Первое касается окружающей среды и ресурсов. Сюда относятся изменения климата, проблемы экосистемы и воды.

Второе направление имеет название «Глобализация» и рассматривает проблемы взаимозависимости, распределения богатства и доходов, демографических изменений, занятости населения, торговли и финансов, подчеркивая, что неравенство и дисбаланс,

присущие сегодняшнему развитию глобальных процессов, могут привести к разрушению мировой экономической и финансовой систем.

Третье направление — «Мировое развитие» — имеет отношение к устойчивому развитию, демографическому росту, преодолению бедности, экологическому стрессу, производству продуктов питания, здравоохранению и занятости населения.

Четвертое направление называется «Социальное преобразование». Речь идет о социальных изменениях, гендерной справедливости, ценностях и этике, религии и духовности, культуре, проблемах идентификации и поведения. Признается необходимость пересмотра ценностей и поведения, на которых сегодня базируется мировое развитие, так как они не учитывают конечность человеческих и экологических ресурсов.

Пятое направление — «Мир и безопасность» — призвано совершенствовать правосудие, демократию, управление государствами, солидарность, мир и безопасность. На сегодняшнем этапе развития мира отмечаются такие явления, как отчужденность, поляризация, насилие, конфликты. Сохранение мира становится жизненно необходимым как само по себе, так и в качестве условия, обеспечивающего прогресс и возможность преодоления проблем, угрожающих будущему.

Программа предусматривает комплексное рассмотрение проблем внутри каждого направления—кластера, т.е. налицо осознание одной из ярких особенностей глобальных процессов — их взаимосвязанность. Каждая рабочая группа ставит задачу и разрабатывает анализ вполне конкретных, последовательно связанных разрешимых проблем в рамках очерченного поля. В процессе развития программы предполагается установление связей и между направлениями-кластерами, так как и более крупные их поля пересекаются.

Новой рабочей программой Римского клуба, принятой в 2012 г., является программа под названием «Основные причины ошибок и пути их преодоления: ключевые вопросы». Программа призвана определить ключевые направления деятельности, которые приведут к устойчивой и стабильной траектории развития на предстоящие 40 лет. Программа состоит из взаимосвязанных четырех кластеров. Первый — это ценности. «Ценности лежат в сердце нашего совместного будущего», — говорится в программе. Могут ли универсальные ценности лечь в основу подлинных действий, спо-

собных защитить и сохранить нашу планету? Заботимся ли мы о нашем будущем? Является ли межпоколенческая открытость и честность основой для долгосрочного взаимодействия? Вот некоторые из вопросов, которые поставили перед собой авторы. Ответы предстоит искать в ряде исследований, посвященных поиску общих универсальных ценностей, их развитию и влиянию на жизнь людей, определению роли образования в формировании ценностей, этики в бизнесе и потреблении и другим подобным вопросам.

Второй кластер «Навстречу новой экономике» рассматривает природные ресурсы, изменение климата, вопросы занятости, подлинные ценности и их роль в экономике, экономический рост и «неэкономический рост», новые парадигмы производства и потребления и др. Третий кластер охватывает круг вопросов, относящихся к занятости населения. Сюда входят вопросы экономического роста и перераспределения занятости населения, вопросы миграции, демографии, нищеты, образования и навыков нового поколения работников, их прав на работу, занятости в сельском хозяйстве и, наконец, будущего самой природы работы в будущей глобальной экономике. Четвертый кластер касается будущего управления на самом высоком уровне организации, создания новых институций, которые бы отвечали новым глобальным вызовам и способствовали обеспечению безопасности и стабильности. Новые глобальные парадигмы управления, возможны ли они, будут ли они работать, как местные решения могут эффективно вплестись в разрешение глобальных проблем, как учитывать общественный интерес, как создать корпоративные модели для исследований и развития, как сочетать ценности, доверие и новые институты — вот круг основных вопросов этого раздела программы.

Еще одно знаменательное событие 2012 года — это доклад Римскому клубу, подготовленный Йоргеном Рандерзом. Весной 2012 г. отмечалось сорокалетие выхода книги «Пределы роста», и вот в конце лета появляется новая книга Рандерза «2052», которая представляет собой прогноз на последующие 40 лет. Она вызвала оживленное обсуждение во всем мире. В книге Рандерз переосмысливает прежний опыт, опирается на личные изыскания в различных областях знания, а также на новейшие исследовательские материалы более чем 30 научных групп. Сам Рандерз говорит о своем новом подходе к моделированию: он не пишет сценарий,

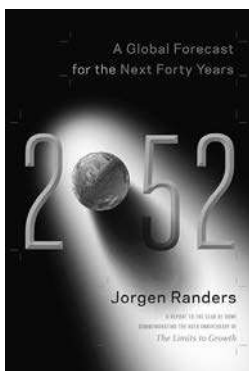


Рис. 5.1. Презентация книги «2052» Йоргеном Рандерзом на заседании Римского клуба

не обсуждает альтернативы, он дает прогноз (Forecast), опирающийся на обоснованную, обдуманную научную догадку (educated guess). Рандерз рассуждает о том, что на сегодняшний день не существует большой неопределенности и нестабильности, что существуют силы, которые сдерживают нежелательные резкие скачки в различных сферах, приводя в пример и рост населения на Земле, и потребление ресурсов (рис. 5.1).



Наряду с крупными программами Римским клубом предлагается большое количество программ, в которых предусмотрено участие любого жителя планеты (рис. 5.2, 5.3).

Налицо изменение фокуса рассмотрения глобаль-



Рис. 5.2. Установление мировой демократии и пересмотр ценностей
Вот что мы можем сделать:

1. Измени привычки — береги планету.
2. Пусть все увидят твои перемены.
3. Увлекай других своим примером.
4. Отмечай прогресс.
5. Реши, что важнее, деньги или жизнь (рис. 5.2)



Рис. 5.3. Альтернативное видение мира: что нужно человеку, чтобы выжить

ных проблем. Сегодня в центр поставлен житель Земли, и все исследования строятся вокруг него. Такая гуманизация необходима на сегодняшнем этапе, но надо сказать, что пути к ней были намечены с самых первых шагов деятельности Римского клуба. С самого начала в исследованиях Римского клуба отмечался мощный и стремительный эффект, производимый глобальными процессами на состояние жизни на Земле. Каково же будущее нашей планеты, что нас ждет, что и как необходимо предпринять для ее сохранения?

Именно эти вопросы вплотную интересовали создателей и участников Римского клуба. Они и попытались дать обоснованные ответы, оставаясь на высоко гуманистических позициях. Следуя за известным высказыванием Махатмы Ганди: «Если хочешь изменить мир, измени самого себя», Э. Ласло возлагает ответственность за судьбу мира на человека, именно человека, а не только на правительства, ученых, различные организации. Он подчеркивает роль каждого индивида в формировании грядущего общества, призывая «мыслить глобально».



Эрвин Ласло (венг. *Laszlo Ervin*; родился 12 июня 1932, Будапешт) — основатель и президент Будапештского клуба, философ науки, исследователь систем и интегральный теоретик. Ласло является руководителем Исследовательской группы общей эволюции, редактором «Журнала общей эволюции», ректором Венской академии футурологии, инициатором создания Международной академии системных исследований, почетным

доктором ряда университетов Америки, Канады, Финляндии, Кореи и Японии. Его авторству принадлежит около 75 книг и 400 статей, изданных на 19 языках (Википедия).

Глобальное мышление возникает как результат опыта жизни в современном глобализирующемся мире, правильной адаптации к нему. Ласло уточняет: «Преимущество глобального мышления заключается не в получении каталога готовых планов для принятия правильных решений во всех мыслимых и немыслимых обстоятельствах, а скорее в обретении перспективы разумного собственного выбора. Глобальное мышление — это не мышление в смутных и общих категориях, в миллионах и миллиардах, будь то людей, гектаров или баррелей нефти. Это — мышление в терминах процессов, а не структур, в терминах динамического целого, а не статических частей. Мыслить глобально означает видеть лес, а не только отдельные деревья» (Ласло, 1998). Ласло считает, что глобальное мышление должно охватывать все, что делает человек: что он ест, на чем ездит и т.д., оно должно стать правилом № 1 в жизни. «Глобальное мышление имеет самое непосредственное отношение к сохранению окружающей среды. Для глобально мыслящего человека отходы и загрязнение воздуха не только иррациональны и вызывают раздражение, но и эмоционально неприемлемы» (Ласло, 1998).

Следующим правилом современного человека, по Ласло, является «акт ответственности. Ответственное действие означает учет всех мыслимых возможностей в любой сфере существования» (Ласло, 1998). Э. Ласло предлагает целый набор высокоморальных правил поведения для современного человека, которые он объединяет в краткий лозунг: «Жить так, чтобы и другие жить могли». Следующая ступень — это ответственное поведение целых групп и институтов, среди которых большое значение имеют действия и стратегии крупных предприятий. Далее он призывает

к ответственности и национальные правительства, хотя их роль, как он считает, явно ослабевает в глобализирующемся мире. Наибольшую тревогу вызывают глобальные процессы, пагубно влияющие на окружающую среду. И тут на первый план опять выходит ответственность каждого человека за сохранение Земли. Необходимо создание и внедрение новой этики, которая бы стала основой морального поведения, способствующего повышению ответственности за окружающую среду.

Свои идеи Э. Ласло воплотил в очередном проекте Римскому клубу под названием «Цели человечества» (Laszlo, 1977), который был представлен в 1977 г. под его руководством. Проект, посвященный исследованию столь высокой материи, как цели развития человечества, ставил две задачи: первая — описать эти цели на различных уровнях, начиная от национального, затем через региональный — к транснациональному и, наконец, — к глобальному. Такое исследование позволило глубже понять взаимосвязь локальных и глобальных процессов и дало возможность выделить общие цели, к которым стремится человечество. К общим целям авторы отнесли прежде всего безопасность планеты, обеспечение продовольствием, а также оптимальное использование энергии и ресурсов. Второй задачей проекта являлась оценка степени понимания и приближения к глобальным целям в различных сферах национальной политики. Для этого были проанализированы действия 19 произвольно выбранных развитых и развивающихся стран, т.е. проект продолжал учитывать локальное и глобальное в их переплетении и взаимосвязи.

Для того чтобы человечество смогло преодолеть глобальные проблемы, недостаточно только их выявить, описать, смоделировать, предсказать возможные последствия, хотя и этого уже очень много. Необходимо также подготовить самого человека к жизни в стремительно меняющемся мире. Основная роль в этом отводится обучению, которое также попало в центр внимания исследователей Римского клуба как важная составляющая предлагаемой стратегии выживания.

В 1979 г. Римскому клубу был представлен доклад «Нет пределов обучению», выполненный под руководством группы ученых из разных стран (США, Марокко и др.) (Botkin, Elmanjra, Malitza, 1979). Исследователи отмечали увеличивающийся разрыв между получаемыми знаниями и реальной картиной мира, считая это явление одной из основных глобальных проблем, препятствующих

преодолению негативных тенденций развития человечества. Для того чтобы достичь понимания существующих мировых проблем во всей их сложности, они предлагали реформировать систему образования, адаптировать его к быстро меняющемуся миру, разрабатывать новые методы обучения, способствующие восприятию и усвоению новых знаний. В условиях стремительно развивающихся научных знаний, стимулирующих внедрение новых технологий во все сферы человеческой деятельности, в системе образования на первый план выходит обучение навыкам приобретения новых знаний и умений. Не оставлен в стороне и нравственный аспект воспитания. В качестве основного условия выживания человечества выдвигается емкое моральное качество человеческого достоинства.

Высокие нравственные призывы, высказанные Э. Ласло и другими последователями идей Римского клуба, нашли свое дальнейшее развитие и продолжают звучать неоднократно, например, в 1993 г. в Чикаго на Парламенте мировых религий, а также в заявлении Союза обеспокоенных ученых, объединившего 1670 ученых из 70 стран, где, в частности, говорилось: «Окружающая среда испытывает на себе нагрузку, достигшую критического уровня... Наше массовое вмешательство во всемирную взаимозаменяемую сеть жизни (вместе с ущербом, нанесенным окружающей среде, уничтожением лесов, уничтожением множества видов и изменениями климата) может стать толчком к запуску механизмов, которые приведут к самым неблагоприятным эффектам, в том числе к непредсказуемой гибели жизненно важных биологических систем, взаимодействие между которыми и динамику которых мы лишь начинаем понимать» (Ласло, 1977). И этот список призывов можно было бы продолжить.

Но в своем стремлении объединиться для решения глобальных проблем человечество не ограничивается лозунгами. Предпринимаются конкретные действия, причем на разных политических и социальных уровнях. Объединяются ученые, экономисты, производственники, политики, и каждая группа вырабатывает свои рекомендации по преодолению глобальных проблем. Вот как формулирует задачу, стоящую перед человечеством, академик РАН Н.Н. Моисеев: «Нужны некоторые общие законы поведения, обязательные для всех граждан планеты, нужны единые стандарты во взаимоотношениях Человека и Природы. Нужна и система восстановления испорченных объектов природной среды, всепла-

нетарная система экологического образования и многое, многое другое, что будет вносить коррективы во всю экономическую и производственную деятельность планетарного сообщества» (Моисеев, 1999).

Другой пример активной заинтересованности в решении глобальных проблем — это проект Института ноэтических наук, основателем которого является американский астронавт Э. Митчел, называемый Pathfinder (<http://www.noetic.org>). Его целью является отслеживание трендообразующих политик и программ, таких как демографические программы от регионального до глобального уровней, программ, направленных на развитие гражданского общества, а также на поддержание экологического и экономического устойчивого развития и т.д. Судя по быстрому количественному и, что немаловажно, качественному росту государственных, научных, общественных, экономических и другого рода организаций, так или иначе связанных с глобальными процессами, можно говорить хотя бы о первых шагах формирования планетарного сознания, о котором упоминали представители Римского клуба, и даже о началах ноосферного сознания по В.И. Вернадскому. Представления о биосфере и ноосфере даны в главе 1. Однако в этой главе нам представляется необходимым подчеркнуть важное нравственное начало идей Вернадского и тот факт, что В.И. Вернадский опередил участников Римского клуба в своем осознании возможной катастрофы при бездумном вмешательстве в биосферу Земли. Еще в начале XX в. он предупреждал о неизбежности последствий стремительно возрастающего воздействия человека на окружающую среду, указывая на то, что человеческая деятельность становится новой, небывалой по мощности своего влияния силой на планете Земля — геологической силой, как он ее называл.

В.И. Вернадский подчеркивал необходимость нравственного начала при взаимодействии человека и биосферы. Человек осознается как часть биосферы. Их взаимное бесконфликтное сосуществование возможно только при осознанном и разумном воздействии человека на среду своего обитания. В.И. Вернадский подчеркивал, что нельзя безнаказанно идти против принципа единства всех людей как закона природы. Именно такое понимание человеческого фактора легло в основу его учения о ноосфере. В этой главе нам бы также хотелось подчеркнуть идею В.И. Вернадского о коллективном мышлении, его веру в человеческий разум как космическую силу, которая меняет лицо нашей планеты.

Он писал: «Исторический процесс на наших глазах коренным образом меняется. Впервые в истории человечества интересы народных масс — всех и каждого — и свободной мысли личности определяют жизнь человечества, являются мерилем его представлений о справедливости. Человечество, взятое в целом, становится мощной геологической силой. И перед ним, перед его мыслью и трудом, становится вопрос о перестройке биосферы в интересах свободно мыслящего человечества как единого целого» (Вернадский, 1998). Ноосфера — это биосфера, сформированная разумом и трудом человека. Таким образом, человек в ответе за ноосферу, от него и его деятельности зависит будущее Земли. Развитие цивилизации определяется успехом человека в созидании ноосферы. Трансформация биосферы в ноосферу является качественно новым этапом становления человеческого общества, более того, это необходимое условие сохранения нынешней цивилизации для ее успешной дальнейшей эволюции.

Ноосфера, по Вернадскому, — это новая форма организации жизни, возникающая в результате взаимодействия законов природы, человеческого мышления и социальных законов (Вернадский, 1998). Трудно переоценить значение идей Вернадского, особенно для решения глобальных процессов, требующего объединенных усилий. Сегодня эти идеи, как никогда ранее, востребованы, положены в основу важнейших документов, разрабатываемых мировым сообществом, например таких как Хартия Земли. В полной мере это относится и к документам Римского клуба.

Детальный анализ существующих представлений и дальнейшее развитие идей о ноосфере представлены в книгах И.В. Ильина и А.Д. Урсула «Эволюционная глобалистика» (2009) и И.В. Ильина, А.Д. Урсула и Т.А. Урсул «Глобальный эволюционизм» (2012). Особый интерес представляют прогностические характеристики ноосферы. Так, характерной чертой будущей ноосферы предполагается ее глобальность. Планетарный характер ноосферы определяется всей глобальной деятельностью. Также подчеркивается управляемость и целенаправленное влияние на ноосферу. «Ноосферогенез как глобально-эволюционный процесс, окажется не стихийно-естественным процессом, а будет рационально управляемым изменением социосферы, реализующим императивы новой цивилизационной парадигмы» (Ильин, Урсул, 2009).

Глобальные процессы удивительным образом сплетаются между собой, порождая новые явления, и очень трудно, если не невоз-

можно, вычленить что-то безоговорочное главное, хотя многие исследователи подчеркивают ведущие области глобализации. Так, многие говорят о главенствующей роли экономики в процессах глобализации, но и эта роль стала возможной в таком виде лишь благодаря другим факторам. Экономическая составляющая глобализации признается чуть ли не ведущей в мировой интеграции. «В основе и современной глобализации, и ее исторических предшественниц лежит интенсивная международная торговля, которая и составляет основное содержание данного явления» (http://www.yuri-kuzovkov.ru/theory/globalizatsiya/#_top). Но торговля — это только часть, может быть, и существенная и, безусловно, самая древняя, способствующая мировой экономической интеграции. Наряду с географическими открытиями, походами завоевателей человечество активно развивало и торговые отношения.

Сегодняшняя экономическая глобализирующая составляющая во многом обусловлена техническими достижениями, мировым политическим развитием, демографическими изменениями, перераспределением занятости и прочими составляющими мирового человеческого развития, включая и человеческий фактор. Одной из основных тенденций экономической глобализации в XX в. была тенденция появления транснациональных корпораций. Их стремительное развитие и количественный рост создали новую мировую экономическую ситуацию — появился транснациональный финансовый, производственный мировой уровень, перешагнувший политические границы государств. К концу XX в. насчитывалось уже более 44 тыс. основных ТНК и более 276 тыс. их дочерних предприятий, что явилось естественным ходом глобального экономического развития, который, безусловно, не мог вызвать однозначной реакции. Сегодня есть как защитники этого нарастающего явления, так и его противники. Сторонники отмечают способствование созданию и распространению новых промышленных и торговых технологий, вовлечение развивающихся стран в мировой экономический тренд, создание новых рабочих мест, независимость от конкретных государств и политиков, свободное движение капиталов и т.д.

Противники же видят явный перекося в развитии мировой экономики, отмечая, что порядка 500 крупных ТНК производят около четверти мирового ВВП, контролируют при этом треть мирового промышленного экспорта. Большая часть этих крупнейших корпораций является американскими, меньшую часть составляют

западноевропейские и японские. Также отмечается их влияние на усиливающийся экономический разрыв между развитыми и развивающимися странами, говорят и об их политическим диктате и монополизации рынков. Но в том, что ТНК играют ведущую роль в процессах глобализации, мало кто сомневается. Также нет сомнения в том, что их роль будет возрастать, как и то, что будет возрастать их количество и продолжаться укрупнение уже имеющих.

Одна из глобальных проблем современного мира — неравномерность уровня развития стран — привлекла к себе пристальное внимание политиков и ученых. Мир, поделенный на так называемые развитые и развивающиеся регионы, таит в себе опасность порождения локальных конфликтов с далеко идущими последствиями. XXI век уже печально ознаменовался катастрофой 11 сентября 2001 г., одна из глубинных причин которой кроется в экономическом и политическом неравенстве стран и народов. К сожалению, эта глобальная проблема остается одной из острейших и по сей день, и ее решение — настоящая перспектива будущего. Ее исследованием занимались ученые и под эгидой Римского клуба, и другие научные коллективы в разных странах. То есть исследования глобальных процессов и их влияния на мировое развитие не осталось лишь приоритетом Римского клуба.

В одной из своих работ Д.М. Гвишиани показывает другие модели мирового развития 1970-х гг. — времени, когда моделирование мировых процессов набирало обороты, предлагая все новые варианты как самих моделей, так и их тематического наполнения (Гвишиани, 1978). Так, группа аргентинских ученых во главе с профессором Эрерой в 1974 г. предложила свою латиноамериканскую модель глобального развития, целью которой стал поиск путей достижения «удовлетворительных условий жизни» для развивающихся стран. Модель предлагает разделение всего мира на четыре региона: Азию, Африку, Латинскую Америку и остальные развитые страны. Цель достигается за счет управления развитием регионов посредством централизованного перераспределения капиталов, т.е. за счет экономической помощи, оказываемой развитыми странами. По мнению авторов, большинство развивающихся стран, где население голодает, в которых существует высокая детская смертность, уже поражены кризисом. Авторы считают, что причины кризисных явлений лежат в порочной системе цен-

ностей и обусловлены неравномерным распределением богатства и власти между странами, а вовсе не истощением невозобновляемых ресурсов, загрязнением окружающей среды или демографическими причинами.

Результаты модели сводятся к двум сценариям. По первому сценарию экономическая помощь развивающимся странам не оказывается. В результате население региона Латинской Америки выйдет на уровень «удовлетворительных условий жизни» примерно через 40 лет, а Азия и Африка ни при каких условиях его не достигнут, и положение по всем жизненным параметрам там будет только ухудшаться. Второй сценарий предполагал оказание помощи развивающимся странам начиная с 1980 г. Причем расчет предполагал помощь в течение 10 лет, начиная от 0,2% ежегодного конечного продукта общего региона развитых стран и увеличивая его до 2%. В этом случае время выхода на уровень «удовлетворительных условий жизни» для населения Азии и Африки составит соответственно 57 и 65 лет.

Такой тип моделей интересен прежде всего как один из примеров поиска решений для преодоления угроз глобальных процессов, а также с точки зрения выбора параметров, получения и описания результатов. К рекомендациям моделей можно отнестись неоднозначно, но необходимо отметить, что проблема неравенства регионов актуальна для мирового сообщества и все еще ждет своего решения.

Будучи серьезной глобальной угрозой, экономическое неравенство между развитыми и развивающимися странами продолжало оставаться предметом исследования и выработки рекомендаций по его преодолению. В связи с этим в 1976 г. была построена математическая модель мировой экономики, легшая в основу проекта «Будущее мировой экономики». Создавалась модель под руководством лауреата Нобелевской премии выходца из России американского экономиста В. Леонтьева. Работа велась в Центре планирования, прогнозирования и политики в целях развития при ООН (Leontief and others, 1976). Модель учитывала 15 регионов, восемь из которых объединяли развитые страны и семь регионов — развивающиеся страны, три из них считались богатыми ресурсами, четыре остальных — нет. Деление на развитые и развивающиеся произведено по величине валового национального продукта на душу населения. Учитывался также тип региона с точки зрения централизации планирования экономики. Регионы были

взаимосвязаны экспортом-импортом по 43 секторам экономической деятельности.

Таким образом, модель является многокомпонентной, новаторской и оригинально построенной, что делает ее интересной для дополнительного обсуждения. Выводом данного исследования было следующее: для того чтобы сократить разрыв в доходах между развитыми и развивающимися странами, необходимо обеспечить ускоренное экономическое развитие последних. С этой целью требуется одновременно осуществить два типа изменений. Первое касается самих стран развивающихся регионов и предполагает глубокие социальные, политические и структурно-организационные изменения в них, второе относится к остальному миру, которому необходимо развиваться в направлении стабилизации товарных рынков, расширения экспорта промышленной продукции из развивающихся стран и т.д.

Во второй половине 1970-х гг. пристальное внимание уделяется еще одной глобальной проблеме — нехватке продовольствия. В связи с исследованием проблемы обеспечения народонаселения планеты продовольствием были созданы несколько моделей. Так возникла глобальная модель SARUM, разработанная в 1976 г. группой системного анализа под руководством профессора из Великобритании П. Робертса (Roberts, 1976). Модель предполагала деление мира на три региона по одному признаку — величине валового национального продукта на душу населения. В это же время в Голландии разрабатывается еще одна модель по проблеме питания для удвоенного населения мира.

Проблема ресурсов тесно связывается с демографическими изменениями. Практически все глобальные модели, начиная с моделей Форрестора, в той или иной степени касаются такой глобальной проблемы, как рост народонаселения Земли. Выводы многих моделей звучали очень тревожно. По сути дела, это центральная глобальная проблема, вокруг которой строятся остальные исчисления природных ресурсов, потребления энергии, функционирования экономики и др. В этой книге раскрывается динамика подходов к прогнозированию численности населения Земли от модели Мальтуса до современного моделирования роста народонаселения нашей планеты. В данной главе мы делаем акцент на гуманистической составляющей этой проблемы и не можем не остановиться на выводах С. Капицы, которые он сделал в своей последней книге, посвященной этому глобальному

вопросу: «Проблема заключается не в ресурсном ограничении, не в глобальном недостатке энергии, а в социальных механизмах управления и распределения знаний, богатства и земли, и особенно остро она проявляется в России. Действительно, как это следует из модели, в мире существуют региональное перенаселение и очевидная бедность, нищета и голод, но это местные, локальные явления, а не результат глобальной нехватки ресурсов» (Капица, 2010). Преодоление этих проблем видится на глобальном уровне с обязательным объединением усилий всех стран — вывод, ставший очевидным для многих ученых и политиков, легший в основу деятельности многих международных организаций, занимающихся глобальными проблемами, и прежде всего ООН. С. Капица связывает благополучие Земли с развитием науки и культуры: «В мире, охваченном глобализацией, проблемы продовольствия, здравоохранения и образования, энергетики и экологии требуют разработки конкретных политических рекомендаций, от которых зависит развитие и безопасность стран и мира в целом. Ведь в современном мире производительные силы достигли такого уровня, что на жизнеобеспечение человечества достаточно 15–20% его рабочей силы. Поэтому происходит перераспределение приоритетов развития, и все большее значение приобретают культура и наука во всех своих проявлениях» (Капица, 2010).

Оптимистичный взгляд на проблему увеличения населения Земли высказал профессор Иллинойского университета Дж. Саймон. Основываясь на долгосрочных исторических тенденциях и аналогиях, экономист Саймон прогнозирует бесконечный технологический прогресс, который и будет основой решения всех глобальных проблем. Саймон верит в беспредельное интеллектуальное развитие человечества и в его беспредельные эволюционные возможности. В своей книге «Основной ресурс» он пишет: «Главным источником нашего возрастающего экономического процветания является человеческий разум ... чем больше людей, тем больше мозгов, продуцирующих идеи» (Simon, 1981).

Но, к сожалению, «мозги, продуцирующие идеи», оборачивались и пагубным воздействием на окружающую среду, которое приняло глобальные масштабы. Развитие промышленности и транспорта сопровождалось увеличением загрязнения жизненного пространства, что заставило искать выход из создавшейся ситуации. В России изучение глобальных процессов и их моделирование в целях выяснения последствий их воздействия в

1970-е гг. также активно велись в Вычислительном центре АН СССР. Инициатором и руководителем таких исследований был выдающийся ученый, гармонично сочетавший в себе естественно-научное и гуманитарное знание, академик Н.Н. Моисеев. Мы уже упоминали об этом. Проводимые исследования основывались на представлении о том, что человек — это часть биосферы, и его существование немыслимо вне ее. Наша цивилизация может выжить лишь в узком диапазоне параметров биосферы. Постоянно возрастающее цивилизационное влияние на окружающую среду создает глобальную угрозу развитию человечества. Исследования группы Н.Н. Моисеева доказали необходимость выработки стратегии развития человеческого общества, гарантирующей гармоничное сочетание человека и окружающей среды, их совместную эволюцию. В Вычислительном центре АН СССР была создана математическая модель «климатической машины» нашей планеты как подсистема глобальной модели биосферы. По свидетельству Н.Н. Моисеева, она представляла собой систему математических моделей, отражающих в весьма укрупненном и обобщенном виде основные процессы, которые определяют климат нашей планеты и их взаимовлияние. Эта модель была специально рассчитана на то, чтобы ставить на ней математические эксперименты типа: «а что, если...». Также на ней оказалось возможным подсчитать более долговременные последствия глобального катаклизма. Эти разработки в дальнейшем позволили российским ученым представить одну из важнейших глобальных моделей XX века, о которой речь пойдет дальше.

Даже краткий обзор возникновения глобального моделирования и его начального развития дает представление об изменении отношения человечества к глобальным процессам. В мире продолжается осознание той опасности, которую несут в себе некоторые из них. Прежде всего к ним относят демографические изменения в сторону роста численности населения планеты; недостаток продуктов питания; истощение запасов невозобновляемых природных ресурсов; растущие потребности в энергетических ресурсах; неравномерность экономического и политического развития регионов планеты; загрязнение окружающей среды и его последствия, отражающиеся на глобальных климатических и эволюционных процессах; дегуманизацию культуры, разработку и наращивание средств массового уничтожения. Глобальное моделирование продемонстрировало тенденцию выявления и исследования тех

глобальных процессов, которые имели отрицательный эффект своего воздействия. Соответственно одной из ведущих концепций стала концепция неизбежности глобальной катастрофы при существующих тенденциях развития общества. На одной модели, которая демонстрирует возможность такой катастрофы, мы остановимся подробнее по двум причинам: во-первых, угроза все еще существует, во-вторых, предотвращение ее реально и просто необходимо и требует объединенных усилий всего мира. Речь идет о модели «Ядерная зима» (подробнее об этом см. разд. 6.3).

В октябре 1983 г. в Вашингтоне состоялась научная конференция, посвященная оценке последствий ядерной войны, на которой был представлен доклад российских ученых Вычислительного центра АН СССР. Доклад с изложением самой модели, техники ее анализа и результатов расчетов был сделан учеником Н.Н. Моисеева Владимиром Александровым. По их личным оценкам и оценкам остальных присутствующих, доклад был триумфальным (Новая газета, 2007). Месяцем ранее результаты Вычислительного центра были представлены в Европе. Вот как об этом вспоминает в своем интервью еще один участник этой исследовательской группы доктор физико-математических наук, профессор А.М. Тарко: «В сентябре 1983 г. “Институт жизни” — всемирно известная международная организация — проводил в Хельсинки симпозиум “Коэволюция человека и биосферы”. Владимир Александров впервые докладывал там о результатах “ядерной зимы”, показывал картинки... Слушатели были в шоке. Помню, у финского академика фон Рихта дрожали руки после доклада, он мне сказал, что прошел всю войну, но так страшно ему не было. Потом было много выступлений Александрова и в Папской академии наук в Ватикане, и в конгрессе США. Сенатор Эдвард Кеннеди публично признал, что та страна, которая начнет ядерную войну, все равно неминуемо погибнет от своих или чужих ядерных ударов. Он подчеркнул важность того, что расчеты “ядерной зимы” получены независимо американскими и русскими учеными» (<http://posterior.by.ru/?mat/nw2>).

Итак, трехмерная гидродинамическая модель, разработанная под руководством Н.Н. Моисеева и предназначенная для расчета изменений климата в результате термоядерного конфликта, оказалась одной из наиболее совершенных и убедительных как для ученого сообщества, так и для мировых политиков. Возможно, именно этим ученым мы обязаны сохраняемым миром.

Совершенно логичным представляется следующий этап развития глобального моделирования, связанный с концепцией устойчивого развития (*sustainable development*). Первые модели устойчивого развития касались экосистем. Такие исследования были проведены, и сделаны выводы о том, что решающее значение для достижения стационарного режима имеет введение в модель параметров восстановления ресурсов и искусственной очистки от загрязнения. Позднее идея устойчивого развития была применена и к другим сферам человеческого бытия. Так, Всемирный банк использовал ее в своих разработках в подходах к измерению активов различных стран. Сегодня можно говорить о трех основных направлениях использования концепции устойчивого развития: экономическом, социальном и экологическом. Ведется поиск таких параметров глобальных процессов в этих сферах, которые могли бы объединить три вышеуказанных направления и определять пути их устойчивого развития во взаимосвязи. В сентябре 2002 г. в Йоханнесбурге (Южная Африка) состоялся Всемирный саммит по устойчивому развитию, на котором присутствовали делегации более 190 стран, входящих в ООН. На саммите был принят план, предполагающий создание и реализацию новой цивилизационной парадигмы социально-экономического развития, которая могла бы обеспечить переход мирового сообщества к устойчивому развитию. Документ саммита был обращен не только к странам-участницам, но и ко всему миру, подчеркивая тем самым важную роль глобализирующегося гражданского общества в планетарном масштабе при переходе мирового сообщества к устойчивому развитию.

Процесс развития глобального моделирования продолжается, привлекая все больше участников всего мира, способствуя созданию новых творческих групп ученых различных направлений знания. Можно сказать, что это процесс глобализируется вместе с поставленными задачами. Важным фактором, определяющим успешность глобального моделирования, является структурирование глобальных процессов. Один из подходов к этой проблеме предлагает Д.М. Гвишиани (Гвишиани, 1978): это многоуровневое представление о мире и соответствующее описание глобальных процессов, его наполняющих. Первый уровень — это взаимодействие регионов и стран со своим комплексом глобальных экономических (например, мировой рынок), политических (международные соглашения и т.д.), научных, экологических, культурных

процессов. Следующий уровень описания и исследования глобальных процессов — регионы или страны с их качественными приоритетами. В качестве приоритетных процессов на этом уровне Гвишиани предлагает следующие: демографические со всем комплексом социальных проблем; производственные с учетом природных ресурсов и научно-технического прогресса; производство продуктов питания. Отдельно им выделяются процессы, связанные с производством продуктов питания, запасами природных ресурсов с учетом влияния на технологические процессы и степень загрязнения среды, а также проблемы научно-технического прогресса. Он также считает важным учитывать антропогенное воздействие на среду обитания, общественно-социальные процессы и различные государственные механизмы управления. По сути дела, предлагается изучение глобальных процессов через их локальное рассмотрение.

Рассмотрим еще одну современную сложную модель, которая была представлена в Нижнем Новгороде, где проводилась XV научная школа «Нелинейные волны — 2010». На школе была прочитана лекция Валентином Павловичем Дымниковым (Институт вычислительной математики РАН) «Проблемы моделирования климата и его изменений» (Дымников, 2011). Основная идея лекции состояла в том, что модель климата есть модель создания мира.

По В.П. Дымникову, климатическая система объединяет атмосферу, океан, криосферу, сушу и биоту. Атмосфера и океан — тонкие пленки, вертикальные движения в которых связаны с преобразованием энергии. Лабораторное моделирование невозможно из-за различия временных масштабов протекающих процессов (от одного часа до десятков и сотен лет). Нельзя «накачать» модель, например, углекислым газом. Более того, имеются лишь короткие ряды измерений, поэтому для исследований остается одно — математическое моделирование.

В.П. Дымников выделяет следующие две проблемы в современной геодинاميке.

1. Прогноз погоды. С математической точки зрения прогноз погоды — некорректная задача Коши (прогноз неустойчивости, по Ляпунову, траекторий системы).

2. Моделирование климата. Здесь нужна модель, которую следует «запустить» (нужно «привязать» ее к солёности в океане, ко льдам в Гренландии и еще ко множеству феноменов), получить

результаты и провести сравнение с изменившимися данными. Задача без начальных условий; должны выполняться законы сохранения массы, баланс углового момента, что важно для возникновения пассатов, баланс полной энергии и др.

В.П. Дымников описал трехмерную климатическую модель, созданную в Институте вычислительной математики РАН, и привел результаты численных экспериментов, совпадающих с реальностью. Обсуждалась также проблема антропогенных выбросов углекислого газа и возможность создания модели Земной системы нового поколения (тропосфера — стратосфера — мезосфера — термосфера, воспроизведение квазидвухлетних и полугодовых колебаний стратосферной циркуляции и т.д.).

Во второй лекции В.П. Дымникова на школе был рассмотрен один из наиболее ярких примеров нелинейного взаимодействия волн со средним потоком в атмосфере — квазидвухлетние колебания зонального ветра в экваториальной стратосфере.

Легко понять, что данные модели — современное развитие модели «климатической машины» Н.Н. Моисеева.

Итак, 70-е гг. XX столетия положили начало глобальному моделированию. Истекшие годы показали, насколько точными или неточными оказались прогнозы первых глобальных моделей, выявились причины неточностей, несбыточности прогнозов. Можно ли сказать, что глобальное моделирование, направленное на решение актуальных мировых проблем, не справилось со своей задачей? Отвечая на этот вопрос, необходимо помнить, что возможности моделирования являются ограниченными, что ни ученые, разрабатывающие модели, ни общественные организации, привлекающие внимание к глобальным проблемам, не принимают окончательного решения, последнее слово остается за политиками, хотя трудно переоценить значение моделей, показавших возможный катастрофический сценарий мирового развития. При всем несовершенстве (с точки зрения сегодняшнего дня!) первые модели, представленные Римскому клубу и выполненные под эгидой других организаций, помогли понять реальную картину мира, осознать существующую глобальную угрозу, представить возможную динамику развития глобальных процессов. Можно констатировать, что глобальное моделирование четко выявило собственно глобальные процессы, имеющие как природные, так и социальные корни, продемонстрировав их значимость для мирового развития. Со временем изменились и сами модели, тоньше стал их аппарат,

целенаправленное выбор объекта исследования, точнее отбор параметров. «Модель — это концептуальный инструмент, ориентированный в первую очередь на управление моделируемым процессом или явлением. При этом функция предсказания, прогнозирования служит целям управления» (Плотинский, 1998).

Осмысление глобальных процессов в их воздействии на мир породило в конце XX века новую отрасль междисциплинарного знания — глобалистику как «междисциплинарную область научных исследований, направленных на выявление сущности, тенденций и причин процессов глобализации, порождаемых ею глобальных проблем и поиск путей утверждения позитивных и преодоления негативных для человека и биосферы последствий этих процессов» (Глобалистика. Энциклопедия, 2003). Таким образом, глобалистика — это область знаний, касающаяся проблем планетарного масштаба, т.е. проблем, присущих планете Земля.

Глобалистика — это новая интегративная область научного знания, которая включает в себя философские, гуманитарные и естественно-научные подходы в изучении глобальных процессов и систем. Взаимодействие глобалистики с другими научными направлениями и возникновение новых областей научных исследований демонстрирует рис. 5.4. Глобалистика тесно взаимодействует с социологией, политологией, экономикой, философией — науками гуманитарного направления. Вместе с тем она интегративно связана с естественными науками — математикой, физикой, нелинейной динамикой, геологией, экологией, палеонтологией. Взаимодействие этих наук рождает основные научные направления в глобалистике. Так, например, в полях пересечения глобалистики с экономикой возникает глобальная экономика, с политологией — политическая глобалистика, с экологией — глобальная экология, с палеонтологией — палеоглобалистика. Историческое направление исследований в глобалистике представлено тремя разноранговыми научными направлениями, изучающими возникновение и развитие глобальных систем и процессов, — универсальной историей (от Большого взрыва и до наших дней), глобальной историей (историей от возникновения Солнечной системы, планеты Земля и до наших дней) и исторической глобалистикой (историей глобализации от первых цивилизаций до наших дней). Эволюционное направление и темпоральный срез представлены эволюционной, палео-, нео-, футуро- и космоглобалистикой.

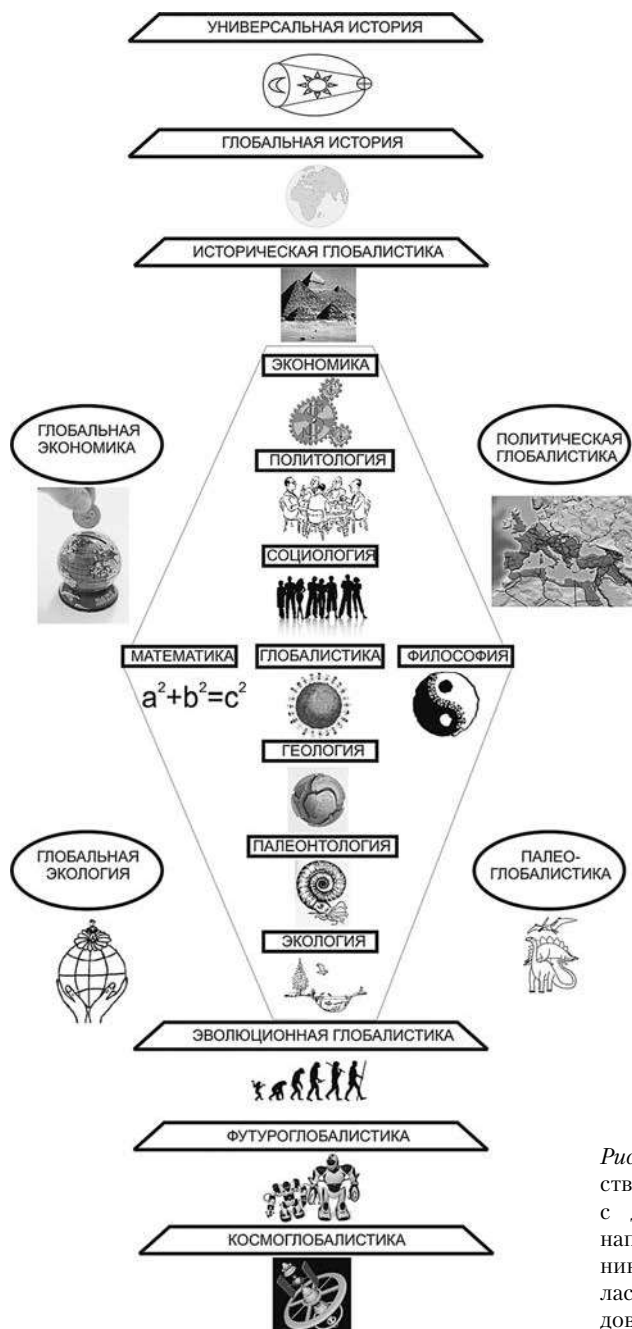


Рис. 5.4. Взаимодействие глобалистики с другими научными направлениями, и возникновение новых областей научных исследований

Предметное поле глобалистики можно представить следующим образом (рис. 5.5).

Подходя с позиций философского осмысления, А.Р. Абдулин различает пять направлений глобалистики в зависимости от конкретно изучаемых процессов и ранжирования глобальных проблем (Абдулин, 1999).

1. Технократическая глобалистика считает научно-технический прогресс главной причиной обострения глобальных проблем и предлагает разрешение этих проблем через дальнейшее совершенствование техники и технологий.

2. Постиндустриальная глобалистика отдает приоритеты глобальным процессам, происходящим в обществе. Представители этого направления видят причины глобальных проблем в изменениях политической, социальной и экономической структурах общества, вызванных переходом от индустриального к постиндустриальному обществу.

3. Эколого-популистская глобалистика. Сторонники этого направления видят источник обострения глобальных проблем во взаимодействии общества и природы.



Рис. 5.5

4. Экзистенциально-культурная глобалистика. Для представителей этого направления характерен более широкий взгляд на генезис глобальных проблем. В качестве основной причины их обострения называется дегуманизация культуры. Решение современного кризиса видится в возвращении подлинного гуманизма, где человек будет нести ответственность за свое бытие.

5. Эволюционно-детерминистская глобалистика. Представители этого направления считают, что феномен техники имеет онтологический статус, т.е. технический прогресс — это часть эволюции природы. Человечество должно лишь правильно настроиться на этот эволюционный процесс, а «мудрость» природы сама разрешит возникший кризис.

Такой взгляд на глобалистику еще раз подчеркивает неоднородность глобальных процессов, их разнообразие и общепланетарное проявление. Отсюда следует, что и их изучение не может быть моноструктурированным. Здесь необходим комплексный, междисциплинарный анализ. Для реализации междисциплинарного подхода требуется объединение усилий и гуманитариев, и естественников. Понимание глобальных проблем невозможно без соединения гуманитарного и естественно-научного знания. Естественно-научное образование начинает осознавать, что оно нуждается в гуманитарном знании, что оно само есть человеческий фактор. Гуманитарное знание нуждается не столько в математико-логическом или естественном образовании, сколько в сопряжении с естественно-научным. Такое взаимопроникновение особенно ярко проявляется при анализе глобальных процессов.

Площадку для объединения гуманитарного и естественно-научного знания предоставляет синергетика. Сегодня нелинейная наука (часто говорят «синергетика») — это новое междисциплинарное направление, цель которого — выявление общих идей, общих методов и общих закономерностей в самых разных областях естествознания, гуманитарных и общественных наук. В рамках синергетики происходит кооперирование различных специальных дисциплин, что так необходимо для изучения глобальных процессов в их воздействии на мировую цивилизацию. Находясь на синергетических позициях, авторы данного издания предлагают продолжить использование различных моделей для анализа отдельных глобальных процессов, что будет представлено далее.

Однако не все глобальные процессы поддаются изучению при помощи моделирования. Прежде чем определить те из них,

которые могут лечь в основу модели, постараемся разобраться в самом явлении, что же считается глобальными процессами. Сегодня существует некая «модная» тенденция отнесения к этому понятию всего, что каким-либо существенным образом проявляет себя в современном мире. Открывая первую конференцию, посвященную глобальным процессам «Сквозь 80-е: думаем глобально, действуем локально» (Торонто, 1980), один из ее организаторов, бывший директор ЮНЕП (Программы ООН по окружающей среде) М. Стронг, подчеркнул: «Существует тенденция поднимать каждый вопрос до глобального уровня. Опасность такого подхода заключается в укреплении ошибочного убеждения в том, что все проблемы могут быть решены только на этом уровне. Существует много глобальных проблем в том понимании, что они могут быть поняты лишь в глобальном контексте. Однако глобальных их решений существует очень мало! Большинство действий по решению этих проблем должны приниматься на “локальном” и национальном уровнях, т.е. с учетом глобального контекста» (Through the 80's. Thinking Globally, Acting Locally. 1980).

Деление происходящих сегодня процессов на глобальные и локальные правомерно, но необходимо помнить о том, что локально зародившись, проблема может очень быстро перерасти в глобальную, требующую самого пристального внимания и объединенных глобальных усилий для ее решения. Таковой, например, является проблема СПИДа и его распространения по планете. Любая эпидемия, локально возникнув, представляет угрозу глобального распространения, именно поэтому одной из рассматриваемых в книге моделей является модель распространения эпидемий (глава 7).

Предлагается считать глобальными в первую очередь те процессы, «влияние которых на стабильность мировой социоприродной системы является очевидным для человечества. Эта очевидность проявляется через тенденции, эмпирически обнаруживаемые исследователями: посредством наблюдений, измерений, сравнений и т.д.» (Ильин, 2009).

Многие процессы, оказывающие глобальное воздействие, объективны или, как отмечал Малкольм Вотерз, «обезличены и находятся вне контроля или устремлений либо какого-то индивидуума, либо группы индивидуумов» (Waters, 2001). К таковым он, например, относил развитие исламского фундаментализма как ответ на воздействие Западной модернизации. В то же время многие глобальные процессы являются продуцируемыми конкретными

авторами, например, все возрастающее бизнес-планирование на уровне глобальных рынков, или возникают в результате осмысления растущих глобальных угроз, например экологических.

Таким образом, можно выделить еще один подход к классификации: глобальные процессы можно разделить на планируемые и непланируемые, подконтрольные (или кажущиеся таковыми) и неподконтрольные, природные и возникающие в результате деятельности человека, которые в свою очередь делятся на осознанные и неосознанные. Возможна классификация по степени воздействия и охвата, по качеству воздействия. Можно выделить группу рефлексивных явлений, возникших как осознание и реакция на какие-то глобальные процессы. Большая часть глобальных процессов, находящихся в центре внимания человечества, предстает в виде проблем или, как сейчас модно говорить, «вызовов».

Своеобразную классификацию предлагает Ватерс, вводя понятие пространственных измерений (dimensions) глобализации (Waters, 2001). Так, К. Маркс, по его мнению, был одним из первых, кто ввел экономическое пространство в глобализацию. Валлерстайн предложил концепцию мира, которая скорее феноменологична, а не географична, и при некоторых условиях допускает интеграцию наций-государств, а также существование мировой системы с разнообразием отдельных культур. Политологи Бертон, Най и другие ввели политическое пространство в глобализацию. Еще один глобальный масштаб связан с переходом на электронные средства связи, расширяющие возможность общения, не выходя из дома, осуществления электронных денежных переводов, платежей, интернет-покупок, что, по мнению Маклухана, может привести к восстановлению коллективной культуры трайбализма на все расширяющемся глобальном уровне.

В анализе глобальных процессов существует также принцип выделения главенствующих из них, вызвавших саму глобализацию либо определяющих ее основные тренды. Политологи, например, важным проявлением глобализации считают процесс «размывания» государственных и национальных границ. Н.Н. Моисеев, наряду с быстроразвивающимся научно-техническим прогрессом, считает появление и развитие транснациональных корпораций ведущим процессом в глобализации мира, причем подчеркивает, что появились они в «результате естественного процесса самоорганизации». Вот как он описывает этот феномен: «Локальные и национальные экономики постепенно стали терять потенцию са-

моразвития, они стали интегрироваться в единый общепланетарный экономический организм с универсальной системой регулирования, которую по инерции называют рыночной или системой свободного предпринимательства» (<http://www.noetic.org>).

Это высказывание очень интересно в контексте нашего подхода к описываемому явлению. По сути дела, на примере появления транснациональных корпораций Моисеев демонстрирует механизм перерождения локальных процессов в глобальные, выделяя при этом основные характеристики, необходимые для причисления процесса к глобальному.

Анализируя принцип выбора глобальных процессов для создания глобальных моделей, а также их различные определения, можно предложить еще один подход к созданию классификации, основанной на объективации глобальных процессов в общем потоке глобализации.

1. Процессы, возникшие в результате научно-технического и технологического прогресса. Основой для этих процессов являются достижения в области науки, техники, объединение усилий ученых в рамках мировых научных программ (например, Большой коллайдер), информационные технологии, буквально объединившие мировое сообщество по всем основным направлениям жизнедеятельности, новейшие транспортные средства, развитие здравоохранения, модернизация бытовых условий, определяющих уровень качества жизни. Сюда же можно отнести глобальные угрозы, возникшие в результате наращивания военных средств уничтожения.

2. Производственные процессы, связанные с увеличением масштабов самого производства, повышением его продуктивности, созданием транснациональных компаний (ТНК) и корпораций, процессами модернизации, мировым распределением производимых брендов, товаров, услуг, ресурсов, глобализацией рынка труда.

3. Экономические глобальные процессы, выражающиеся в расширении и укреплении мировых экономических связей, в свободном движении капитала, усилении мирового влияния ТНК, движении на мировом рынке труда.

4. Экологические глобальные процессы, связанные с использованием природных ресурсов, с выбросами предприятиями вредных веществ, другими воздействиями человека на окружающую среду. Именно осознание наносимого вреда окружающей среде

стало одним из первых объединяющих факторов для мирового сообщества в борьбе с экологическими проблемами.

5. Политические процессы, проявляющиеся в новых реалиях взаимодействия государств (объединенная Европа), ослаблении государственных границ, увеличении свободы передвижения граждан, капиталов, товаров, услуг, возникновении межгосударственных мировых общественных организаций, усилении их роли в мировой политике, влиянии ТНК, выработке новых форм принятия мировых политических решений, большей открытости мировой политики благодаря глобальной интернет-сети.

6. Социальные процессы, часто возникающие на локальном уровне и перерастающие в общемировые социальные процессы, например социальные движения в защиту окружающей среды, объединение людей в единую глобальную сеть общения, расширение культурного, духовного и познавательного кругозора, рост толерантности, обретение большей экономической, политической и духовной свободы, принятие общих стандартов в жизненном стиле (например, можно говорить о мировой моде, тенденциях в питании и здоровом образе жизни и т.д.). Нельзя не учитывать и протестные настроения, и террористические угрозы.

7. В эту группу объединим все природные явления, оказывающие глобальное воздействие на живую и неживую природу и, конечно же, на человека.

Безусловно, представленная классификация не охватывает все количественное и качественное разнообразие глобальных процессов. Она лишь в самом общем виде намечает пути возможного отнесения глобального процесса к той или иной группе, тем самым способствуя его пониманию на новом уровне. Она еще раз показывает взаимосвязь и вариативность глобальных процессов, направленных на становление общего, единого, взаимозависимого мира.

Учитывая отмечаемый всеми воздейственный эффект глобальных процессов, нельзя не задуматься о той возможной будущей действительности, к которой они могут привести. Такое восприятие процессов глобализации и породило огромное количество футурологических прогнозов разных уровней и осмысления. Картинки вырисовываются очень разные в зависимости от того, кто их предлагает: социологи представляют глобальный мир в виде единого общества, но гармоничным его очень трудно представить, скорее там воцарится хаос, политологи тоже говорят о гомогени-

зации политического мира, экологи — о глобальной катастрофе, и уж совсем угрожающие картинки рисуют кино и литература.

Для выработки стратегии дальнейшего существования человечеству необходимо постижение глобальных процессов, их осознание, исследование и прогнозирование возможных результатов их влияния на планетарное развитие. В центре внимания исследователей глобальных процессов всегда оказывался еще один важный вопрос — каким должен быть человек в меняющемся глобальном мире. Приведем один из ответов, который сформулировал Н.Н. Моисеев: «Человек должен осознать свою принадлежность не только к своей семье, стране, нации, но и ко всему планетарному сообществу. Он должен почувствовать себя членом этого сообщества, принять на себя ответственность за судьбу всего человечества, за жизни чужих ему и далеких от него людей.

Человек должен научиться по-иному относиться к Природе, отказаться от опасной иллюзии господства над ней и научиться жить, следуя законам Природы» (Моисеев, 1999).

Новые вызовы глобализации ставят человека в совершенно новые для него условия жизни, меняя его взгляды, менталитет, поведение. Одно из самых ярких таких проявлений — это создание единого мирового пространства при помощи новых средств связи, которые в свою очередь стремительно развиваются, предоставляя человечеству все новые и новые возможности. Время и пространство начинают выполнять совсем другие социальные функции. У людей появилась способность одномоментного как бы присутствия в разных местах, по крайней мере, одномоментной информированности о происходящем в разных местах.

Казалось бы, глобализация может привести к унификации, стиранию национальной самобытности в поведении, культуре, чем и пугают антиглобалисты. Как тут не вспомнить карикатуру, нарисованную В. Гавелом: бедуина, едущего на верблюде в джинсах под своей национальной одеждой и попивающего кока-колу. Однако тенденции XXI века говорят не только о сохранении своей самобытности, но и о явном ее подчеркивании даже среди молодежи развитых стран. Вот что пишет английский социолог К. Фокс об английской молодежи: «На мой взгляд, за последнее время произошла одна значительная перемена: возросло количество стилей разных субкультур, возможно, как реакция на процесс глобализации, оказывающий влияние на господствующие тенденции в нашей культуре» (Фокс, 2008).

Глобализация предъявляет еще одно социальное требование к человеку, связанное с доверием и риском. Жизнь общества в стремительно глобализирующемся мире постоянно проходит под знаком диады риск — доверие, что реализуется в самых разнообразных сферах жизнедеятельности. Ежедневно человеку приходится доверять незнакомым людям, каким-то обезличенным силам (рыночные отношения) и разработанным для него нормам (права человека), виртуальным биржам, которые оказываются вне контроля отдельного индивидуума или группы людей. Таким образом, человек оказывается или осмысленно ставит себя в зависимость от других людей с определенной долей риска. При таких условиях высокая нравственность и сознательный вклад доверия всех участников является залогом благосостояния каждого человека. При сокращении рисков у человека вырабатывается определенный запас доверчивости, что может иметь и обратную сторону негативного проявления, например чрезмерного доверия к необоснованным слухам, влияющим на резкое изменение общественно-го поведения и создание панических настроений. «Доверчивая» паника создает риск глобального коллапса.

Литература к главе 5

- Абуллин А.Р. Основы глобалистики: Учеб. пособие. Уфа: РИО БАГСУ, 1999.
- Арзоянц Э. Глобализация: катастрофа или путь к развитию? М.: Новый век, 2002.
- Бабурин С.Н., Мунтян М.А., Урсул А.Д. Глобализация в перспективе устойчивого развития. М.: Магистр: ИНФРА-М, 2011.
- Бек У. Что такое глобализация? М.: Прогресс — Традиция, 2004.
- Вебер А.Б. Неoliberalная глобализация и ее оппоненты // Полития. 2002. № 2 (25).
- Вернадский В.И. Философские мысли натуралиста. М.: Наука, 1998.
- Волков А. Солнце, звезда человеческая // Знание — сила. 2009. № 11. С. 28—31.
- Гвишиани Д.М. Методологические проблемы моделирования глобального развития // Вопросы философии. 1978. № 2. С. 14—28.
- Гидденс Э. Социология. М.: Эдиториал УРСС, 1999.
- Глобалистика. Международный междисциплинарный энциклопедический словарь. М.; СПб.; Н.-Й., 2006.
- Глобалистика. Энциклопедия. М.: Радуга, 2003.
- Глобалистика: персоналии, организации, издания. М.: Альфа-М, 2012.
- Дымников В.П. Проблемы моделирования климата и его изменений // Нелинейные волны' 2010. Н. Новгород: ИПФРАН, 2011.
- Ильин И.В. Теоретико-методологические основы глобалистики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009.
- Ильин И.В., Урсул А.Д. Эволюционная глобалистика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009.

- Ильин И.В., Урсул А.Д., Урсул Т.А. Глобальный эволюционизм: идеи, проблемы, гипотезы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012.
- Капица С. Парадоксы роста. Законы развития человечества. М.: Альпина нон — фикшн, 2010.
- Ласло Э. Пути, ведущие в грядущее тысячелетие. Проблемы и перспективы // Вопр. истории естествознания и техники. 1977. № 4.
- Ласло Э. Пути, ведущие в грядущее тысячелетие. Проблемы и перспективы // Вопр. истории естествознания и техники. 1998. № 1.
- Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. М.: Наука, 1972.
- Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л. и др. Пределы роста. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991.
- Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс И. За пределами роста. М.: Прогресс, 1994.
- Медоуз Д., Рандерс И., Медоуз Д.Л. Пределы роста. Тридцать лет спустя. М.: Академкнига, 2007.
- Моисеев Н.Н. Быть или не быть ...человечеству. М.: Ульяновский Дом печати, 1999.
- Моисеев Н. Путь к очевидности. Расставание с простотой. М.: Аграф, 1998.
- Печчеи А. Человеческие качества. М.: Прогресс, 1985.
- Плотинский Ю.М. Теоретические и эмпирические модели социальных процессов. М.: Логос, 1998.
- Чумаков А.Н. Глобализация. Контуры целостного мира. М.: Проспект, 2009.
- Фокс К. Наблюдая за англичанами. Скрытые правила поведения. М., 2008.
- Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: АСТ, 2003.
- Фридман Т. Плоский мир. Краткая история XXI века. М.: АСТ, 2007.
- Юнг К.Г. Синхрония: акаузальный объединяющий принцип. М.: АСТ, 2010.
- Энциклопедия для детей. М.: Аванта, 2003.
- Botkin J., Elmanjra M., Malitz M. No Limits to Learning. Bridging the Human Gap. A Report to the Club of Rome. Oxford, etc.: Pergamon press, 1979.
- Giddens A. Runaway World: How Globalization is Reshaping our Lives. N.Y.: Routledge, 2003.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W. The Limits to Growth. N.Y.: Universe Books, 1972.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J. Beyond the Limits. Post Mills, VT: Chelsea Green Publishing Company, 1992.
- Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. Limits to Grow. The 30-Year Update. Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, Vermont, 2000.
- Forrester J.W. World Dynamics, Cambridge, MA: Wright-Allen Press, 1971.
- Kaya Y., Suzuki Y. Global Constraints and New Vision for Development. Japan Work Team of Club of Rome. COR Technical Symposium. Tokyo, 1973.
- Laszlo E. Goals of Mankind. N.Y.: Dutton, 1977.
- Leontief W. and others. The Futures of the World Economy: A Study on the Impact of Prospective Economic Issues and Policies on the International development Strategy United Nations. N.Y.: Oxford University Press, 1976.
- Mesarovic M., Pestel E. Mankind at the Turning Point. N.Y.: Dutton reader's digest press, 1974.
- Roberts P. System Analysis Research Unit Models (SARUM) // Papers for Symposium on Global Modeling. Laxenburg, Austria. ILASA, 1976.
- Robertson R. Globalization: Social Theory and Global Culture. London, 1992.
- Simon J. The Ultimate Resource. Princeton. University Press, 1981.
- Tinbergen J. and others. Reshaping the International Order. A Report to the Club of Rome. N.Y., 1976.

Strong M. and others. Trough the 80's. Thinking Globally, Acting Locally. Washington, 1980.

Waters M. Globalization. Key Ideas. L.; N.Y., 2001.

<http://www.merriam-webster.com/dictionary/globalization>

<http://www.clubofrome.org>.

http://www.ccas.ru/manbios/kak_daleko_r.html

<http://www.enotes.com/wh-encyclopedia/globalization>

<http://posterior.by.ru/?mat/nw2>

<http://www.bookrags.com/Globalization>

<http://www.noetic.org>

http://www.yuri-kuzovkov.ru/theory/globalizatsiya/#_top



6.1. Как возникает нелинейность в социальных и экономических системах

Понятие «нелинейность» является одним из ключевых понятий нелинейной динамики. Все глобальные процессы нелинейны по своей сути, поэтому для их анализа, изучения и моделирования необходимо владение понятием «нелинейность»¹. Вот как пишет известный специалист в области математической физики, автор и переводчик многих научных и научно-популярных книг Ю.А. Данилов о нелинейности (Данилов, 1982):

«Среди множества почетных титулов, которые принес нашему веку прогресс науки, “век нелинейности” — один из наименее звучных, но наиболее значимых и заслуженных. Нелинейность всепроникающая и вездесущая, многолика и неисчерпаемо разнообразна. Она повсюду: в большом и в малом, в явлениях быстротечных и длящихся эпохи. Нелинейность — это рождение и аннигиляция элементарных частиц. Гигантское Красное пятно на Юпитере и оглушительный хлопок пастушьего кнута, биение сердца и всепроникающий луч лазера, теплый свет свечи и нескончаемая изменчивость волн, болезни и исцеление, вызов искусству аналитика и мастерству экспериментатора, надежды и бессилие создателей теорий и тех, кто подвергает их замыслы суровой экспериментальной проверке.

Нелинейность — понятие емкое, с множеством оттенков и градаций. Нелинейность эффекта или явления означает одно, нелинейность теории — другое.

Нелинейный эффект — это эффект, описываемый некоторой нелинейной зависимостью. Математически такого рода зависимости выражаются нелинейными функциями одного или нескольких переменных.

¹ Дополнительные сведения о нелинейности приводятся в главе 1.

Мир линейных функций утомительно однообразен: стоит изучить лишь одну линейную функцию, как вы знаете все наиболее существенное о всех линейных функциях. Не приносит каких-либо неожиданностей и переход к большему числу измерений. Геометрический образ линейной функции, каков бы ни был ее физический смысл, в зависимости от числа независимых переменных — прямая, плоскость или гиперплоскость. На одинаковые приращения независимой переменной линейная функция беспристрастно (то есть независимо от значения независимой переменной) откликается одинаковыми приращениями. Это означает, что линейная зависимость не обладает избирательностью. Она не может описывать ни резонансных всплесков, ни насыщения, ни колебаний — ничего, кроме равномерного неуклонного роста или столь же равномерного и столь же неуклонного убывания.

Мир нелинейных функций, так же как и стоящий за ним мир нелинейных явлений, страшит, покоряет и неотразимо манит своим неисчерпаемым разнообразием. Здесь нет места чинному стандарту, здесь безраздельно господствуют изменчивость и буйство форм. То, что точно схватывает и передает характерные особенности одного класса нелинейных функций, ничего не говорит даже о простейших особенностях типичного представителя другого класса. Геометрический образ нелинейной функции — кривая на плоскости, искривленная поверхность или гиперповерхность в пространстве трех или большего числа измерений. На одинаковые приращения независимой переменной одна и та же нелинейная функция откликается по-разному в зависимости от того, какому значению независимой переменной придается приращение. Почти полным безразличием к изменению одних и повышенной чувствительностью к изменению других значений независимой переменной нелинейные функции разительно контрастируют с линейными. Именно здесь и проходит демаркационная линия между миром нелинейных и миром линейных явлений».

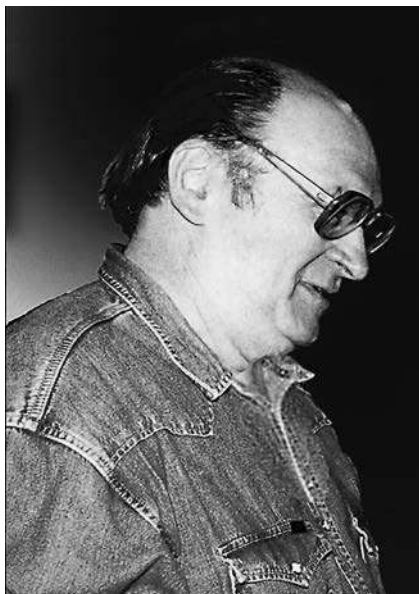
Что же такое нелинейность, откуда она берется и что вносит новое в динамику систем?

Свойства нелинейных систем зависят от их состояния, а их математическое поведение описывается нелинейными уравнениями, содержащими изучаемые величины в степенях, больше единицы, или коэффициенты, зависящие от этих величин.

Э. Петерс пишет следующее (Петерс, 2000):

«Когда я был аспирантом-математиком, то мы изучали только линейные уравнения. Мы изучали их потому, что они имеют

Юлий Александрович Данилов (1936–2003) — известный специалист в области математической физики, автор и переводчик многих научных книг. Работал старшим научным сотрудником в РНЦ «Курчатовский институт». Много лет занимался переводами трудов А. Эйнштейна, Г. Кирхгофа, А. Пуанкаре, В. Паули, И. Пригожина и др. Ю.А. Данилов жил в причудливом мире науки, где для него не было запретных областей. Математика, физика, естествознание в целом, творцы науки, популяризация науки, собственные книги и переводы практически со всех европейских языков, преподавание — далеко не полный перечень его интересов (см.: Юлий Александрович Данилов. Прекрасный мир науки. М.: Прогресс—Традиция, 2008).



единственное решение. Они имели приложения в физике и технике. Они были аккуратны.

Нелинейные дифференциальные уравнения выглядели бесполезными ввиду того, что имели множество решений, которые казались не относящимися к реальности. Они были сложны, беспорядочны и выглядели исключениями.

Теперь мы знаем, что... эти уравнения полезны именно по тем причинам, по которым их стремились избегать раньше. Жизнь неупорядочена. Она изобилует возможностями. Поэтому необходимы модели со множеством возможных решений».

Нелинейность в естественных науках — физике, химии, биологии и т.п. — это всегда некоторое, порой достаточно сложное и завуалированное взаимодействие.

В социальных и экономических системах нелинейность тоже проявляется в виде взаимодействия. Однако нелинейность таких систем очень сильно определяется психологией как отдельного индивидуума, так и социальных групп. Здесь интересно проследить крушение линейной парадигмы для описания процессов на глобальных финансовых рынках. До недавнего времени все подобные модели были линейны и базировались на двух основных предположениях.

1. Модель рационального инвестора. Она предполагает, что инвесторы линейно реагируют на информацию, т.е. используют ее сразу после получения, а не ожидают ее накопления в ряде последующих событий. Это означает, что прошлая информация всегда учтена, найдя свое отражение в стоимости ценных бумаг на данный момент. С точки зрения математики это означает, что рациональный инвестор желает среднестатистической эффективности. Он оценивает потенциальную прибыль методом вероятностного взвешивания, который дает ожидаемую прибыль. Риск измеряется как стандартное отклонение прибылей. Инвесторы предпочитают стратегии, которые дают наивысшую прибыль при заданном уровне риска. Они не любят рисковать.

2. Модель эффективного рынка. Цены отражают всю имеющуюся на данный момент информацию. Изменения в цене не соотносятся между собой. Стоимость определяется консенсусом большого количества участников рынка.

Оба этих предположения означают, что модели финансового рынка строятся на основе линейного подхода к обществу. Если следовать ему, то люди, получая информацию, немедленно ее используют. Можно показать, что в рамках линейной теории прибыли нормально распределены и приблизительно независимы.

Однако доводы, лежащие в основе линейной модели рынка капитала, несостоятельны. Линейная модель должна быть заменена нелинейной. Где же в этой модели возникают нелинейные эффекты? Они в первую очередь лежат в психологии человека.

- Люди не реагируют на информацию сразу после ее получения. Они откликаются на нее некоторое время спустя, если она подтверждает изменение в недавнем тренде. Эта нелинейная запаздывающая реакция — противоположность линейной реакции гипотетического рационального инвестора.
- В психологии нет подтверждений тому, что люди являются более рациональными в совокупности, чем поодиночке. Доказательством этому служат социальные перевороты, преходящие увлечения и моды.
- Люди не всегда питают отвращение к риску и часто стремятся рисковать. Особенно если осознают, что они обречены на потери, если не будут этого делать.
- Люди полны предубеждений в своих субъективных оценках. Так, они уверены в своих предсказаниях всегда существенно больше, чем это оправдано имеющейся информацией.

Если учесть эти факторы, то мы приходим к нелинейным моделям в экономике и социологии. Однако на этом пути много сложностей. Пожалуй, известны лишь результаты удачного математического моделирования на основе методов нелинейной динамики экономических процессов (есть даже книги на эту тему). Круг других решенных задач беднее, тому немало глубоких и принципиально неустранимых причин (Гидденс, 1994):

- Отсутствие в истории, политологии, социологии фундаментальных законов, т.е. универсальных связей между основными социальными переменными, допускающих точное количественное выражение (закон сохранения энергии и «вечные» двигатели, социальные проекты и неизвестные законы социологии).
- Неустраняемая неточность «измерений» (электоральные предпочтения).
- Разномасштабность, разнородность и нелинейность изучаемых науками об обществе явлений, процессов (от нескольких сотен до нескольких сотен миллионов человек; наличие нелинейных прямых и обратных связей).
- Постоянное усложнение общества, его самоорганизация (новые знания становятся частью общества, изменяя его характеристики и свойства), бесконечная погоня математической модели за изучаемым объектом.

Поэтому к математическому моделированию глобальных процессов в обществе, в том числе при использовании методов нелинейной динамики, следует предъявлять дополнительные методологические требования:

аккуратное разграничение математических и житейских терминов, звучащих одинаково, но зачастую имеющих разный смысл («хаос», «порядок», «бифуркация»);

нельзя покушаться на твердо установленные факты и закономерности, следует избегать соблазна научных «революций», прикрытых математическим «флером»;

не нужно подменять собой специалистов в науках об обществе («пассионарность» этноса, связываемая с действиями внеземных сил, и математические модели эволюции «пассионарности»);

трезво оценивать, какие процессы в обществе можно моделировать с достаточной степенью точности, а для каких еще преждевременно говорить об исследовании с достаточной полнотой. Исследования можно условно подразделить на фундаментально-ориентированные (направленные на выяснение общих

свойств объектов и связанные с крупной реальной проблемой) и конкретно-прикладные (опирающиеся на полученные ранее фундаментальные знания и дающие количественные характеристики).

Подчеркнем также, что чаще речь идет не о количественных показателях как таковых, а о сравнительном анализе процессов, протекающих в обществе. Остановимся на некоторых из моделей глобальных процессов, протекающих в человеческом обществе, и рассмотрим их более подробно. Начнем рассмотрение с модели мировой динамики Форрестера и различных последующих вариантов этой модели.

6.2. Модели «мировой динамики» для описания глобального развития

Первой моделью, с одних позиций описывающей глобальные экономические, демографические, экологические процессы, по праву считается модель «Мировой динамики» Дж. Форрестера (Форрестер, 2003).

«Мировая динамика» Форрестера — модель глобального развития — была создана по заданию Римского клуба в 1970 г. Напомним, что в 1968 г. общественный деятель и бизнесмен Аурелио Печчеи создал Римский клуб — неправительственную организацию ученых, предпринимателей и общественных деятелей — с целью анализа и поиска решений глобальных проблем (см. гл. 5). Очень быстро было понято, что для реализации цели нужны математические модели. Отсюда последовало обращение клуба к профессору Массачусетского технологического института Джею У. Форрестеру, который руководил группой системной динамики. Форрестер сравнительно быстро создал грубую, если не сказать, примитивную модель процессов в мировой системе («Мир-1»), а затем усовершенствованную модель «Мир-2». Эта модель и анализ результатов, а также основные выводы составили содержание вышедшей в 1971 г. книги Форрестера «Мировая динамика» (Форрестер, 2003).

Впоследствии по совету Форрестера Римский клуб предложил Деннису Л. Медоузу возглавить группу по разработке модели мирового развития. 13 марта 1972 г. в Вашингтоне в Смитсоновском институте был впервые представлен коллективный труд «Пределы роста. Доклад Римскому клубу» (Meadows et al., 1972). В дальней-

шем книга была переведена более чем на 35 языков. В СССР она была переведена впервые в 1991 г. (Медоуз и др., 1991), поскольку ее основные идеи не отвечали официальной идеологии тех лет. В 1992 г. вышла новая книга «За пределами роста» (Meadows et al., 1992) (русский перевод (Медоуз и др., 1994), появился в 1994 г.). Наконец, в 2002 г. была издана книга «Пределы роста. Тридцать лет спустя» (Meadows et al, 2002) (русский перевод (Медоуз и др., 2007)), в которой использовалась модель «Мир-3».

Джей Форрестер (англ. *Jay Wright Forrester*) — американский инженер, разработчик теории системной динамики. Родился 14 июля 1918 г. в Анселмо, штат Небраска. Окончил университет штата Небраска в Линкольне и Массачусетский технологический институт в Кембридже. Разработчик одного из первых универсальных компьютеров по заказу ВМС США. Разработал теорию системной динамики. Автор книг «Основы кибернетики предприятия» (1961), «Динамика городов» (1969), «Мировая динамика» (1971). В 1968 г. награжден премией «Изобретатель года» и медалью Вальдемара Поулсена Датской академии технических наук.



В предисловии к третьей книге авторы обращают внимание на следующее.

«Мы хотим напомнить, что для понимания основных выводов совсем не обязательно самому вводить модель World 3 в компьютер и детально изучать ее. Самые важные выводы — о вероятности глобальной катастрофы — вовсе не основаны на слепой вере в графики, нарисованные моделью. Они вытекают из простого понимания динамики поведения глобальной системы, которая определяется тремя ключевыми факторами: существованием пределов, постоянным стремлением к росту, а также запаздыванием между приближением к пределу и реакцией общества на это. Любая система, которой свойственны эти три фактора, рано или поздно выйдет за пределы и разрушится. Модель World 3 основана на причинно-следственных связях, которые описывают пределы, запаздывания и рост. Поскольку причинно-следственные связи

никто в мире не отменял, вас не должно удивлять, что реальный мир идет по пути, который был описан в сценариях “Пределов роста”».

Мы, однако, кратко изложим модель Форрестера и некоторые результаты ее исследования, следуя работе С.А. Махова (Махов, 2005) для того, чтобы была понятна математическая структура модели.



Деннис Медоуз — кибернетик, профессор Массачусетского технологического института, специалист в области системной динамики, член Римского клуба. Получил степень бакалавра химии в Карлтон-колледже (США), степень PhD в области менеджмента в Массачусетском технологическом институте, где специализировался по проблемам системной динамики, финансов и менеджмента научных исследований. В течение 35-летней педагогической деятельности преподавал в трех американских университетах дисциплины, связанные с бизнесом, инженерией и социальными науками. Десять его книг были переведены более чем на 30 языков. Одна из книг удостоена Германской премии мира и названа одной из 10 наиболее важных книг XX в. по проблемам окружающей

среды. Книга Д. Медоуза «Пределы роста. 30 лет спустя» признана одной из наиболее важных книг по глобальной проблематике.

Медоуз входил в советы управляющих крупнейших компаний США и Западной Европы, жил и работал в шести странах, консультировал правительства и бизнес-группы более чем в 40 странах. Профессор Д. Медоуз удостоен множества наград, премий, отличий (премия 1975 года Баварской ассоциации охраны окружающей среды, премия 2005 года EURONATUR, Орден Почета Венгерской Республики, 2006 год и др.). Деннис Медоуз является Почетным профессором МГУ имени М.В. Ломоносова, Почетным доктором РХТУ имени Д.И. Менделеева, Почетным доктором Международного университета (в Москве).

В модели Форрестера для так называемых системных уровней пишутся дифференциальные уравнения одного и того же типа:

$$\frac{dy}{dt} = y^+ - y^-,$$

где y^+ и y^- — соответственно положительный и отрицательный темпы скорости переменной y , которые включают в себя все факторы, приводящие к росту и убыванию y . Предполагается, что $y^\pm$ может быть представлена как произведение функций, зависящих только от «факторов» комбинаций основных переменных, являющихся функциями системных уровней:

$$y^\pm = g(y_1, y_2, \dots, y_n) = f(F_1, F_2, F_k) = f_1(F_1)f_2(F_2)\dots f_k(F_k),$$

где $F_j = g_j(y_{i1}, \dots, y_{im})$ — факторы, причем $m = m(j) < n$, $k = k(j) < n$ (число уровней). Таким образом, факторов меньше, чем основных переменных, и каждый фактор зависит не от всех системных уровней. Именно это позволяет упростить моделирование.

Форрестер считает, что в модели мировой системы протекают и взаимодействуют 1) демографические процессы; 2) процессы накопления капитала и производства, в том числе производства продуктов питания; 3) процессы истощения природных ресурсов и загрязнения среды обитания.

Состояние системы описывается основными переменными (уровнями):

- численностью населения P (измеряется количеством людей);
- количеством накопленного капитала (основные фонды) K (единицей капитала является условная величина — капитал, приходящийся на душу населения в 1970 г.);
- долей капитала (фондов) в сельском хозяйстве, т.е. в отрасли обеспечения пищей, X (безразмерная величина, находящаяся в интервале между нулем и единицей);
- уровнем загрязнения (или просто загрязнением) Z (за единицу принимается загрязнение, приходящееся на одного человека в 1970 г.);
- количеством невозобновляемых (невосстановимых) природных ресурсов R (единицей ресурсов считается их годовое потребление в 1970 г.);

К факторам, благодаря которым и осуществляется взаимодействие переменных, относятся:

- относительная численность населения P_p (население, нормированное на его численность P в 1970 г.);
- удельный капитал K_p ;
- материальный уровень жизни C ;
- относительный уровень питания (количество пищи на человека) F ;

- нормированная величина удельного капитала в сельском хозяйстве X_p ;
- относительное загрязнение Z_s ;
- доля остающихся ресурсов R_R .

Форрестер вводит также понятие фактора «качество жизни» Q , который зависит от четырех факторов P_p, C, F, Z_s .

Для системных уровней уравнения выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{dP}{dt} &= P(B - D), \\ \frac{dK}{dt} &= K_+ - \frac{K}{T_K}, \\ \frac{dX}{dt} &= X_+ - \frac{X}{T_X}, \\ \frac{dZ}{dt} &= Z_+ - \frac{Z}{T_Z}, \\ \frac{dR}{dt} &= -R,\end{aligned}$$

где $B = B(C, F, P_p, Z_s) = c_B B_c(C) B_F(F) B_p(P_p) B_z(Z_s)$ — темп рождаемости; $D = D(C, F, P_p, Z_s) = c_D D_c(C) D_F(F) D_p(P_p) D_z(Z_s)$ — темп смертности; $K_+ = K(P, C) = P K_c(C)$ — скорость производства основных фондов; $X_+ = X(F, Q) = X_F(F) X_Q(Q_{CF}) / T_X$ — прирост доли сельскохозяйственных фондов; T_k и T_x — характерное время выбытия производственных и сельскохозяйственных фондов соответственно; $Z_+ = Z(P, K_p) = P Z_k(K_p)$ — скорость генерации загрязнения; $T_z = T_z(Z_s)$ — характерное время естественного разложения загрязнения; $R_- = R_-(P, C) = P R_c(C)$ — скорость потребления ресурсов.

Все величины с подстрочными индексами (B_c, B_F, K_c и т.д.) представляют собой таблицы с линейной интерполяцией. Эти таблицы строились или задавались либо экспертами в необходимой области, либо самим Форрестером.

Кроме того, учитываются следующие константы: $c_B = 0,04$ — нормальный темп рождаемости; $c_D = 0,028$ — нормальный темп смертности; $c_K = 0,05$ — нормальный темп фондообразования; $T_K = 40$ лет — постоянная износа основных фондов; $T_X = 15$ лет — время выбытия сельскохозяйственных фондов. Расчет производился с 1900 г.

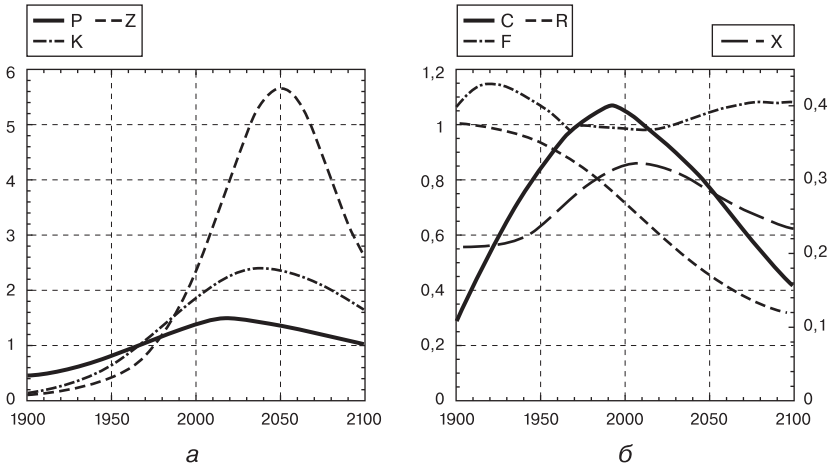


Рис. 6.1. Модель Форрестера в первоначальном виде (кризис ввиду истощения ресурсов): а — численность населения P ; основные фонды K ; уровень загрязнения Z ; б — уровень питания F ; уровень жизни C ; количество ресурсов R ; доля фондов в сельском хозяйстве X (значения переменных даны в относительных единицах)

Параметры модели, начальные данные и частично табличные функции (в частности, c_B , c_D , c_K) подбирались так, чтобы динамика системы совпадала по возможности с реальной мировой динамикой в период с 1900 по 1970 г., а далее система использовалась для прогнозирования. Результаты расчета представлены на рис. 6.1.

Из рисунка следует, что после периода монотонного роста численность населения с 2050 г. начинает уменьшаться и за 75 лет сокращается в 1,5 раза (почти на 2 млрд человек). Невозобновляемых природных ресурсов к 2100 г. остается меньше 1/3 начальных запасов. Уровень загрязнения к 2050 г. в несколько раз превышает стандартный уровень Z_N , затем начинает падать из-за общего упадка промышленности и сокращения численности населения. Уровень жизни достигает максимума приблизительно к 2000 г., после чего начинает падать. После 1970 г. относительный уровень питания приблизительно до 2015 г. незначительно уменьшается, потом вырастает из-за уменьшения населения, но в целом он остается стабильным вследствие заложенного в модели механизма распределения инвестиций по отраслям. Заметим, что с сокращением ресурсов резко падают численность населения и промышленное производство.

Одно из важных упущений в модели Форрестера — фиксация технологического уровня на данном этапе и экстраполяция совре-

менных инвестиций в части потребления ресурсов, роста загрязнения, демографической динамики, выбытия плодородных земель. Результат очевиден, что и доказывает необходимость включения в модель развития технологий.

Форрестер варьировал параметры модели, но это приводило лишь к изменениям количественным, а общая картина упадка сохранялась (рис. 6.2).

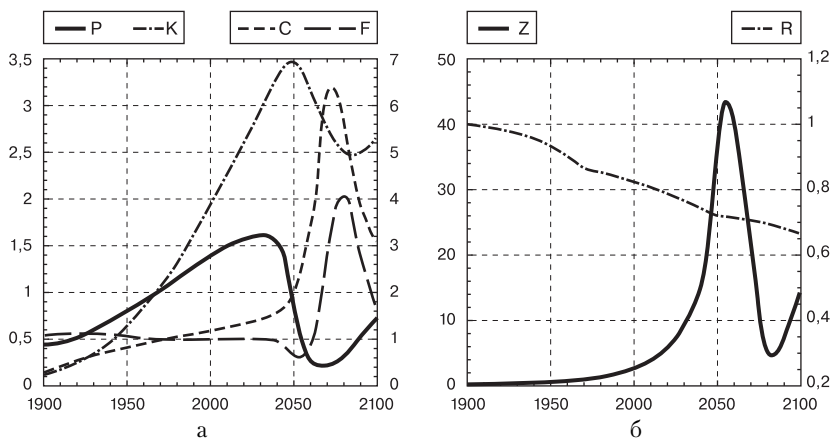


Рис. 6.2. Результаты модели Форрестера в предположении о снижении в 1970 г. скорости потребления ресурсов в 4 раза, что могло быть вызвано, к примеру, их экономией

Конечно, модель Форрестера — качественная модель для выявления общих тенденций динамики основных переменных, а также для анализа чувствительности результатов по отношению к различным заложенным в модель предположениям. Самое важное в модели — правильный учет причинно-следственных связей системы. О количественном совпадении результатов моделирования и реальных данных речи и не шло. Так, например, в 2000 г. реальная численность населения была чуть больше 6 млрд человек, а модель «Мир-2» предсказывала 5 млрд человек. Подчеркнем еще раз, что для глобальной модели важно поведение переменных: если что-то хоть как-то удастся предсказать, то модель строилась не зря. Кстати, вопрос о справедливости данной модели мировой динамики до сих пор остается открытым, поскольку не прошли сроки прогноза.

Итак, модель предсказывает неизбежность кризиса из-за истощения ресурсов и роста загрязнения, если сохранить современ-

ные тенденции и не принимать никаких мер к предотвращению кризиса.

Форрестер считал, что в рамках его модели способом избежать кризис с экспоненциальным ростом является переход к глобальному равновесию, когда переменные системы выходят на стационарные значения и не меняются. Видоизменив модель и введя с 1970 г., следующие ограничения: 1) темп потребления ресурсов уменьшен вчетверо; 2) генерация загрязнения уменьшена вдвое; 3) фондообразование уменьшено на 40%; 4) производство продуктов питания уменьшено на 20%; 5) темп рождаемости уменьшен на 30%, Форрестер добился выход на стационарное состояние ряда переменных.

Сам он прекрасно понимал и писал, что без регенерации отходов и применения заменителей истощение природных ресурсов все равно вызовет кризис в его модели. Динамика переменных до 2150 г. показана на рис. 6.3. Видно, что основные параметры стабилизируются до конца XXI в., а потом истощение ресурсов все же вызывает кризис.

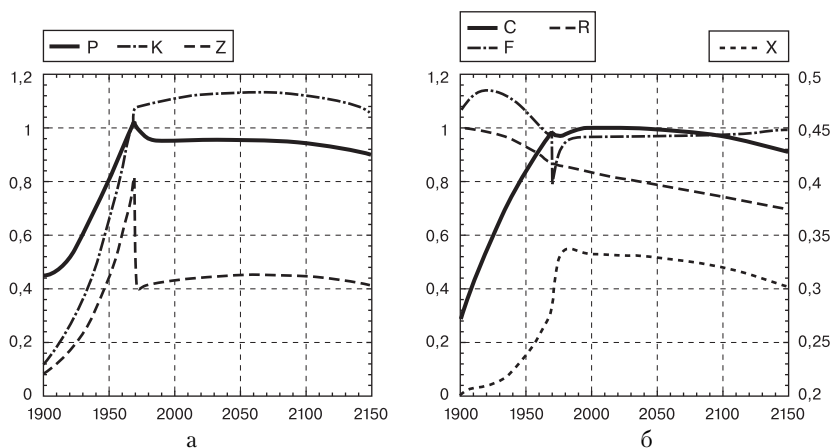


Рис. 6.3. Модель Форрестера при ограничениях 1–5

На основании результатов исследования в рамках моделей «Мир» можно констатировать, что модель Форрестера — простая, ясная и полезная модель сложной системы, основанная на применении методов системной и нелинейной динамики. Она дала толчок к созданию целого класса подобных моделей, получивших название глобальных.

В своей статье С.А. Махов справедливо критикует модель, отмечая, в частности, следующее: в модели «не учитывается много важных факторов, явным минусом также является затрудненная идентификация модели, некоторые зависимости носят непроверяемый фантастический характер, метод построения модели не во всем адекватен, рекомендации Форрестера по предотвращению кризиса нереалистичны».

Исследования Форрестера продолжил его ученик Д. Медоуз, результаты его работы изложены в трех известных упомянутых выше книгах и основаны на модели «Мир-3». По мнению С.А. Махова, «несмотря на большую детализацию и кажущуюся поэтому большую объективность по сравнению с моделью Форрестера, модель “Мир-3”, как нам представляется, является еще более некорректной, чем “Мир-2”». Сам Медоуз признавал, что обладал всего лишь 0,1% необходимой информации, остальное, по-видимому, он придумал сам. Поэтому, наверное, некоторые зависимости (табличные функции) получились просто неверными. Излишнее усложнение модели привело к тому, что ее идентификация еще более затруднилась (ввиду того, что количество параметров модели выросло почти в три раза). То, что результаты в целом совпали, связано было именно с тем, что костяк модели остался прежним (т.е. такой же, как и в модели Форрестера), главным образом, это касается уравнений для ресурсов и загрязнения. А раз так, то и получается тот же эффект. Иначе говоря, достоинств значительно не прибавилось, а вот минусов стало гораздо больше, поэтому усложнение, проведенное Медоузом, представляется с этой точки зрения (полученные результаты по отношению к затраченным усилиям) неоправданным.

По тому же пути усложнений и детализации моделей двигались и последующие исследователи. Среди прочих работ по глобальному моделированию выделяются работы Месаровича — Пестеля, Эрреры, Кайя — Судзуки, Линнемана, Робертса, В. Леонтьева, в Советском Союзе модели создавались коллективами ВНИИСИ и ВЦ АН СССР.

В подавляющем большинстве случаев эти модели очень «раздуты», количество переменных и параметров в них исчисляется сотнями или даже тысячами. Такие сверхсложные модели неудобовлетворительны: их трудно верифицировать, поскольку жизнь не стоит на месте, а мы имеем дело с необратимо развивающейся сложной системой; в них трудно понять, какие факторы являются

определяющими, а какие сопутствующими; есть опасность подмены понимания вычислениями.

Следующий этап развития глобального моделирования связан с концепцией устойчивого развития, что потребовало модификации модели Форрестера. В частности, национальная концепция США по устойчивому развитию содержит следующие условия:

- 1) скорейшая стабилизация численности населения планеты;
- 2) сокращение потребления (отказ от излишеств в потреблении);
- 3) минимизация удельных расходов сырья и энергии во всех видах производства; замена везде, где это возможно, невозобновимого сырья на возобновимое;
- 4) недопущение роста загрязнений; переход к более чистому промышленному производству;
- 5) привлечение науки к решению возникших проблем, в частности, создание необходимых технологий.

Условия 1, 3, 4 практически совпадают с условиями, при которых в модели Форрестера может иметь место стационарное решение (при соответствующих модификациях). Одна из таких модификаций была сделана в работах коллектива под руководством В.А. Егорова, а другая — в работе С.А. Махова.

Исследования эти тесно связаны. Основной вывод из исследований состоит в том, что решающее значение для достижения стационарного режима имеют введение восстановления ресурсов и искусственной очистки загрязнения. Причем, введение восстановления ресурсов без очистки загрязнения не всегда достаточно для достижения глобального равновесия.

В заключение этого раздела приведем длинную цитату из последней книги Денниса Медоуза.

«На основании наших исследований мы по-прежнему делаем выводы о том, что еще в первой половине следующего столетия существующие социально-экономические и политические тенденции приведут к разрушению основ индустриального общества, если не будут осуществлены значительные изменения. В 1972 г. мы отводили на смену курса 50 лет, но теперь время сжалось, а политики все еще пытаются идти проторенной дорогой. Глобальные проблемы изменения климата, истощение ресурсов нефти, деградация сельскохозяйственных земель, дефицит пресной воды и их последствия уже проявились или проявятся в течение нескольких ближайших десятилетий. Еще не поздно перейти на путь устойчивого развития. Однако многие важные возможности были утрачены из-за 35-летнего отрицания очевидных фактов.

Россия занимает особое место по отношению к перечисленным проблемам. Эта страна, чья подпись привела в действие Киотский протокол. Россия до сих пор обладает богатыми природными ресурсами, по крайней мере, в сравнении с другими промышленно развитыми странами. Крах старой системы в 1990-х годах дал возможность гражданам переосмыслить цели развития и инвестиционные стратегии. Поэтому у России немного больше времени для подготовки к переменам. Удастся ли ей их совершить? Не знаю. Но я на это надеюсь...»

На вопрос, есть ли у России будущее, пытался с позиций системного анализа ответить академик Никита Николаевич Моисеев (Моисеев, 1998). В разделе «Основная опора» (с. 417) он пишет следующее: «...сохранение и развитие нашего образования — основная опора в формировании российского будущего». И далее: «Оно должно стать основной заботой нашего правительства, а гражданское общество необходимо должно создать такую общественную атмосферу, которая обеспечивает престиж профессии. Именно учителю, т.е. человеку, способному передавать эстафету знаний и культуры, во всем многообразии его деятельности, предстоит в новой цивилизации ведущая роль. Еще раз — не политику, генералу и даже не ученому, а именно учителю предстоит стать центральной фигурой наступающей эпохи, если... если она состоится.

Все остальное — производные от образования и нравственности, которая тоже идет от учителя.

Это утверждение относится не только к России — оно универсально. Я убежден, что оно станет основой общепланетарной цивилизации, которая (повторю еще раз — если она состоится) не может не стать гуманитарной».

Заметим, что в последнее время исследователи, занимающиеся моделями мировой динамики, включают в них образование.

И еще одна цитата, связанная с местом научных школ в построении новой России: «Итак, одно из важнейших условий, необходимых для построения новой России — сохранение научных школ. Общество, государство должны следовать старому крестьянскому принципу: “хочешь собрать урожай, сохрани посевной материал любой ценой”.

Любой!

Всем можно жертвовать, кроме знаний и мастерства» (Моисеев, 1998, с. 420).

6.3. О моделях «ядерной зимы»

Как отмечалось, в 1971 г. в Венеции прошла первая конференция ЮНЕСКО, посвященная глобальным проблемам. С основным докладом «Пределы роста» выступил Д. Медоуз. Доклад «прошел под “барабанный бой”», — писал Н.Н.Моисеев. — Пожалуй, только я был его единственным оппонентом. Дело в том, что к этому времени у нас уже были продуманы свои принципы будущей работы, имевшей целью построение вычислительной системы, имитирующей функционирование биосферы. И те элементарные подходы, которые рекламировались Медоузом и которые в своей основе имели методы системной динамики Форрестера, с моей точки зрения, никак не соответствовали сложности задачи» (Моисеев, 1998).

Скепсис Н.Н. Моисеева был оправдан тем, что в ВЦАН СССР велась работа над созданием вычислительной системы, математического обеспечения и банков данных для анализа эволюции мировой динамики и, в частности, последствий атомной войны. Эта работа заняла, по свидетельству Моисеева, все 70-е гг. Первые расчеты были проведены на грани 80-х гг.

Что было известно к этому времени? Профессор П. Крутцен из Института Макса Планка еще в конце 70-х гг. занимался ответом на вопрос, почему погибло огромное количество жителей Дрездена и Гамбурга во время англо-американских авианалетов. Он пришел к выводу, что это связано с эффектом огненного торнадо, динамика которого подобна цепной реакции. Им было показано, что большие потоки теплового излучения при доступе кислорода и поглощении этого излучения и являются причиной эффекта, для возникновения которого достаточно превысить порог, равный приблизительно 100 Вт см^{-2} , после чего начинают гореть асфальтовые покрытия и железные балки перекрытий. При этом узкие улицы и высотные дома в современных городах создают сильную тягу, поэтому пожар, если кислорода достаточно, прекращается только тогда, когда иссякнет горючий материал. Оказалось, что для возникновения огненного торнадо совершенно не обязательно взрывать ядерные бомбы, но оно обязательно возникнет и при атомном взрыве.

Как указано в (Богданкевич, 2002), американский профессор Дж. Хилл показал, что ядерные взрывы с тротильным эквивалентом в 1,3 и 10 Мт могут выжечь 500, 1000, 2100 км² лесов, а порог

возникновения огненного торнадо становится ниже – менее чем в 60 Вт см^{-2} .

Важно, что возникающие при атомных взрывах ударные волны и пожары помимо разрушительного эффекта страшны тем, что в атмосферу выбрасывается огромное количество пыли, дыма, сажи. Расчеты показали, что если на европейский город с миллионным населением будет сброшена водородная бомба, то возникшее облако сажи поглотит полностью солнечное излучение. Причем, на восстановление прозрачности примерно до 80%, по оценкам, потребуется около трех месяцев.

В 1983 г. профессор Корнельского университета Карл Саган опубликовал в журнале «Амбио» несколько сценариев возможной крупномасштабной ядерной войны (взрывы 100, 1000 или 10 000 водородных бомб), полученных в результате компьютерного моделирования. К. Саган высказал гипотезу, что в результате войны на Земле может установиться «ядерная ночь» и как следствие – «ядерная зима». Расчеты показали, что при взрыве указанных зарядов в Северном полушарии при любом из этих вариантов оно практически целиком покроется непроницаемым для солнечного света облаком сажи горящих городов уже через несколько часов после начала атаки. Просветление атмосферы может занять несколько лет. Как пишет Н.Н. Моисеев (Моисеев, 1998, с. 7), «наш коллектив был тогда единственной организацией в мире, располагающей системой модели, достаточной для численных оценок, и необходимой информацией для того, чтобы проверить гипотезу Сагана. Расчеты были проведены летом 1983 г. и полностью подтвердили справедливость гипотезы американского астронома» (Моисеев, 1985, с. 7). Математическая модель биосферы Земли, созданная под руководством Н.Н. Моисеева, получила название «Гея». Расчеты по этой программе показали, что из-за атмосферных циркуляций пятна облаков сажи в течение одного-двух месяцев сольются в одно целое и закроют всю Землю сплошным непроницаемым для солнечного света покрывалом. При этом средняя температура поверхности понизится на $15\text{--}20^\circ\text{C}$, а в отдельных местах – даже на $40\text{--}50^\circ\text{C}$. Таким образом, при определенных условиях в Сахаре могут установиться сибирские морозы, а положительные температуры сохранятся только на некоторых островах Тихого океана. Но самое главное было в том, что биосфера не возвращалась в исходное состояние, которое было до войны. Окончательное состояние биосферы становилось иным, чем при

котором появился человек. Возник вопрос, сможет ли он жить в новой биосфере.

Известно, что облака сажи значительно уменьшают альбедо Земли¹, что приводит к сильному поглощению солнечной энергии верхними слоями атмосферы. Это, в свою очередь, приведет к инверсии температурного градиента по высоте, поэтому холодный воздух перестанет подниматься вверх, и прогрев нижних слоев атмосферы будет происходить только за счет теплопроводности. Температура верхних слоев тропосферы повысится до нескольких десятков градусов выше нуля, быстро начнут таять горные ледники, льды Гренландии и Антарктиды. Приведем цитату из (Богданкевич, 2002, с. 171): «По мере просветления атмосферы начнется быстрое повышение температуры поверхности и на планете начнется “ядерное лето”. Климат станет везде очень жарким и сухим. Как написал Моисеев, это будет уже без свидетелей.

Вся флора погибнет от ядерной “зимы”, так как прекратится фотосинтез, потом погибнет и фауна, так как будут разорваны все экологические цепочки. Возможно, что в глубинах океана что-то и сохранится, так как теплоемкость океана огромна, и он практически не замерзнет. Будет уничтожен и озоновый защитный слой, так что природе придется все начинать сначала, на это уйдут миллионы лет».

Результаты расчетов группы Н.Н. Моисеева были доложены на конгрессе 1 ноября 1983 г. в Вашингтоне, они имели огромный международный резонанс и повергли в шок стратегов СССР и США.

С какого-то времени стали считать, что изложенная выше теория «ядерной зимы», которая внесла определенный вклад в проблему вооружения, уже не актуальна.

В частности, в 2000 г. Михаил Горбачев заявил: «Модель, представленная российскими и американскими учеными, показала, что ядерная война приведет к “ядерной зиме” и глобальной экологической катастрофе. Осознание этого стало для нас стимулом к действию». В начале 2009 г. Дмитрий Медведев и Барак Обама подписали соглашение о сокращении количества ядерных боеголовок. Казалось бы, мир задумался над своим будущим.

¹ Альбедо Земли — отношение количества энергии, отраженной Землей, ко всей лучистой энергии, падающей на Землю от Солнца.

Почему же сейчас американские ученые вернулись к этой теме (Робок, Тун, 2010)? Логика возвращения такова: гонка ядерных вооружений продолжается в разных регионах мира, поэтому даже локальный ядерный конфликт может привести к локальной ядерной катастрофе. В качестве примера анализируется возможная война между Индией (50 боеголовок) и Пакистаном (60 боеголовок), в которой может быть использовано до 100 ядерных зарядов, составляющих только 0,4% от всего всемирного запаса (25 тыс. ядерных боеголовок). По расчетам, этого запаса боеголовок будет достаточно для уничтожения всех агрокультур из-за выброса в атмосферу большого количества сажи и дыма. Причем, такой конфликт может привести к гибели огромного количества людей в странах, находящихся в тысячах километров от зоны боевых действий.

Программа компьютерных расчетов позволяла учитывать гораздо большее число факторов, чем, скажем, программа «Гея»; в частности, в модель включалось влияние океанов и атмосферных явлений. Расчеты показали, что пожары, вызванные взрывами 100 ядерных бомб в случае конфликта между Индией и Пакистаном, поднимут в атмосферу 5 млн т дыма и сажи. Это облако аэрозолей накроет регион уже через пять дней. На десятый день оно достигнет экватора, а через 4–9 дней мгла окутает всю планету; 20 млн погибнет в зоне конфликта от ударной волны, радиации и пожаров; 1 млрд жителей планеты, уже сегодня страдающих от голода, умрут из-за разрушения мировой сельскохозяйственной системы.

Средняя температура на планете понизится на 1,25 °С, и даже через десять лет она будет на 0,5 °С ниже нормы, что приведет к заморозкам даже в летний период. Частицы дыма и сажи под воздействием солнечного света нагреют атмосферу, поэтому поступающая в эту зону двуокись углерода усилит процесс разрушения озонового слоя. Озоновая дыра, существующая сейчас в регионе Южного полюса, распространится по планете, открыв путь для смертоносного ультрафиолетового излучения.

Понижение температуры, засуха и уменьшение потока солнечного света приведут к сокращению периода, благоприятного для вызревания сельскохозяйственных культур. К указанным воздействиям добавятся летние заморозки и высокий уровень ультрафиолетового излучения. В сельском хозяйстве наступит коллапс.

Единственный способ избежать климатической катастрофы авторы (Робок, Тун, 2010) видят в запрещении ядерного оружия.

Сознавая ответственность за столь пессимистические прогнозы, авторы (Робок, Тун, 2010, с. 36) пишут следующее: «Результаты данного исследования были опубликованы в журналах. Однако масштабного исследования по глобальному воздействию ядерного конфликта на окружающую среду в последние годы не проводилось. Именно поэтому мы обращаемся к коллегам с просьбой проверить наши расчеты для сценария глобального и регионального ядерного конфликта». Детали моделей можно найти в работах (Toon et al, 2007; Robock, 2007).

Литература к главе 6

- Богданкевич О.В. Лекции по экологии. М.: Физматлит, 2002.
- Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л. и др. Пределы роста. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991.
- Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс Й. За пределами роста. М.: Прогресс, 1994.
- Медоуз Д., Рандерс Й., Медоуз Д. Пределы роста. Тридцать лет спустя. М.: ИКП Академкнига, 2007.
- Моисеев Н.Н. Расставание с простотой. М.: Аграф, 1998.
- Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера: Опыт систематического анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука, 1985.
- Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. М.: Мир, 2000.
- Форрестер Дж.У. Мировая динамика. М.: АСТ, 2003.
- Данилов Ю.А. Нелинейность // Знание – сила. 1982. № 11. С. 34–36.
- Махов С.А. Математическое моделирование мировой динамики и устойчивого развития на примере модели Форрестера. Препринт. М.: ИПМ РАН, 2005.
- Робок А., Тун О.Б. Локальная ядерная война и глобальная катастрофа // В мире науки. 2010. № 3. С. 32.
- Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. Limits to Growth, The 30-Year Update. Chelsea Green Publishing Company. White River Junction, Vermont, 2002.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W. The limits to growth: a report for The Club of Rome's project on the predicament of mankind. N.Y.: Universe Books, 1972.
- Meadows D.H., Meadows D. L., Randers J. Beyond the limits: confronting global collapse, envisioning a sustainable future. Toronto: McClelland & Stewart, 1992.
- Robock A., Oman L., Stenchikov G.L., Bardeen C., Turco R. Climatic Consequences of Regional Nuclear Conflicts, Atmospheric Chemistry and Physics. 2007. N 7 (8).
- Robock A., Oman L., Stenchikov G.L. Nuclear winter revisited with a modern climate model and current nuclear arsenals: Still catastrophic consequences // J. of geophysical Research: Atmospheres. 2007. 112 (D13).
- Toon O.B., Robock A., Turco R.P., Bardeen C., Oman L., Stenchikov G.L. Consequences of Regional // Scale Nuclear Conflicts. Sci. 2007. N 315(2). P. 1244.



Глава 7

ЛОГИСТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ КАК БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

При анализе моделей глобальных процессов особого внимания заслуживают модели, которые базируются на уравнениях логистического типа. Это связано с тем, что логистическое поведение характерно для многих процессов в живой природе и обществе. Логистическое уравнение является базовой моделью для описания многих глобальных процессов и дает как качественное, так и количественное согласие с известными статистическими данными глобального развития человечества. Так, в главе 9 рассмотрены модели демографии, базирующиеся на распределенном аналоге логистического уравнения — нелинейном уравнении диффузии с квадратичной нелинейностью, а также дискретные модели, которые демонстрируют логистическое поведение численности популяций.

В данной главе мы приведем ряд примеров применения логистического уравнения для качественного и количественного описания процессов в человеческом обществе, начав с анализа эпидемиологической задачи распространения заболевания и биологической задачи роста численности некоторой популяции. Далее мы перейдем к анализу социальных и экономических систем с использованием логистического уравнения.

7.1. Модель распространения заболевания

В качестве яркого примера можно привести динамику распространения заболеваний.

Начнем изложение с короткого рассказа о вспышке эпидемии холеры в 1854 г. в Лондоне, когда применение естественнонаучного подхода оказалось полезным как с практической, так и теоретической точки зрения. В то время о причинах и путях распространения холеры было практически ничего неизвестно, поэтому внезапные вспышки заболевания являлись страшными бедствиями для людей, уносившими многие жизни. Так, в описы-

ваемом 1854 г. только за три дня (с 31 августа по 2 сентября) было зафиксировано 83 случая смертельного исхода от заболевания холерой. И тогда английский врач Джон Сноу (John Snow) придумал нанести на карту Лондона все зарегистрированные случаи смертей от холеры (рис. 7.1).

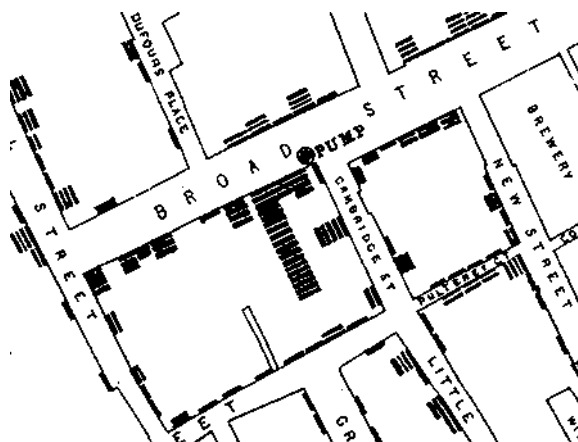
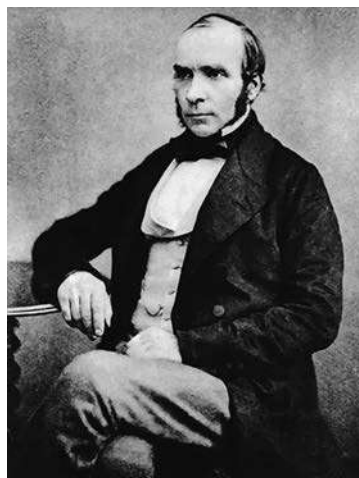


Рис. 7.1. Карта Лондона с помеченными случаями зарегистрированных смертей от холеры (показаны темными толстыми линиями)

Джон Сноу (John Snow) (15.03.1813 — 16.06.1858) — английский врач, первым применивший эфир как анестезирующее вещество при операции. Стал известен в Англии, когда доказал, что причиной холеры является употребление недоброкачественной воды. Сделал большой вклад в развитие анестезиологии как специальности. Его работы с эфиром привели к созданию различных приспособлений для ингаляции эфира и к публикации книги «On the Inhalation of Ether» в 1847 г. Вскоре он приобрел репутацию ведущего анестезиолога в Лондоне. Джон Сноу также ввел в медицинскую практику анальгезию при родах. В 1853 г. проводил анестезию хлороформом Королеве Виктории, когда она рожала Принца Леопольда. Сноу имел плохое здоровье и умер 16 июня 1858 г., когда ему было 45 лет.



После того, как это было сделано, оказалось, что подавляющее число смертей произошло в окрестности улицы Broad Street,

и Д. Сноу пришел к выводу, что источником заражения является колодец, расположенный на этой улице. Тогда он решил, что необходимо удалить рукоятку у колодца, после чего пользоваться этим колодцем стало невозможно, и местные жители вынуждены были ходить к другим источникам за водой, что сразу же привело к прекращению вспышки заболевания. Таким образом, помимо того, что была ликвидирована вспышка заболевания, было установлено, что источником заражения холерой является некачественная вода.

Рассмотрим теперь простую модель распространения заболевания в человеческом обществе. Изучение процессов распространения эпидемий в человеческом обществе представляет собой несомненный интерес для человека. Для успешной борьбы с эпидемиями нужно знать не только механизм воздействия инфекции на человеческий организм, но и то, как происходит распространение заболеваний. И если ответ на первый вопрос должна дать медицина, то при изучении второго вопроса (как происходит распространение эпидемий) оказать помощь в понимании проблемы может нелинейная динамика. Рассмотрим самый простой случай, когда заболевание распространяется среди группы восприимчивых индивидуумов, но удаления их из популяции за счет гибели, выздоровления или изоляции не происходит. Такая постановка задачи, в частности, может оказаться приемлемой для начальных стадий некоторых заболеваний верхних дыхательных путей, так как при таких заболеваниях может пройти много времени, прежде чем источник инфекции будет удален из популяции. Будем полагать также, что рассматриваемая группа индивидуумов достаточно многочисленна, чтобы можно было использовать математический аппарат дифференциального исчисления, но в то же самое время эта группа компактно сосредоточена в некоторой области, так что пространственными аспектами распространения эпидемии можно пренебречь.

Пусть имеется n индивидуумов, восприимчивых к данному заболеванию, а в момент времени $t = 0$ в группу попадает один источник инфекции. Рассмотрим равномерно перемешанную группу, состоящую из $(n + 1)$ индивидуумов. Пусть в момент времени t в этой группе имеется x восприимчивых индивидуумов и y источников инфекции, т.е.

$$x + y = n + 1. \quad (7.1)$$

Разумно предположить, что среднее число новых случаев заболевания, появляющихся в интервале dt , будет пропорционально

как числу источников инфекции, так и числу восприимчивых индивидуумов. Если частота контактов между членами этой группы равна b , то среднее число новых случаев заболевания, появляющихся в интервале dt , будет равно $bxydt$, т.е.

$$dx = -bxy dt. \quad (7.2)$$

Знак « $-$ » в правой части уравнения (7.2) указывает на то, что число восприимчивых индивидуумов x уменьшается за интервал времени dt на величину $bxydt$. Если ввести безразмерное время $\tau = bt$, то эволюционное уравнение примет вид:

$$\frac{dx}{d\tau} = -x(n - x + 1) \quad (7.3)$$

при начальном условии

$$\tau = 0, x = n. \quad (7.4)$$

При построении данной модели полагается, что зараженный индивидуум становится заразным для остальных восприимчивых индивидуумов сразу после того, как он сам заразится, т.е. что латентный период равен нулю.

Решением полученного уравнения является зависимость

$$x(\tau) = \frac{(n+1)n}{n + e^{(n+1)\tau}}. \quad (7.5)$$

На практике во время эпидемии регистрируется обычно число новых случаев заболевания, появляющихся за сутки или за неделю, а не общее число заболевших. Поэтому более удобно рассматривать динамику нарастания числа новых случаев, описываемую так называемой эпидемической кривой. Соответствующее ей уравнение имеет вид:

$$\frac{dy}{d\tau} = -\frac{dx}{d\tau} = x(n - x + 1) = \frac{n(n+1)^2 e^{(n+1)\tau}}{(n + e^{(n+1)\tau})^2}. \quad (7.6)$$

Это симметричная одновершинная кривая с одним максимумом. Таким образом, получено характерное свойство эпидемий: число новых случаев заболевания сначала быстро возрастает, в какой-то момент достигает максимума, а затем уменьшается до нуля. Такая форма эпидемической кривой является чисто математическим следствием принятого допущения о том, что среднее

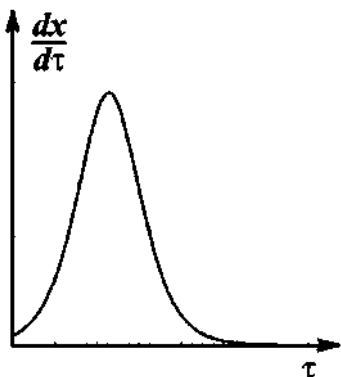


Рис. 7.2. Эпидемическая кривая

число новых случаев пропорционально как числу восприимчивых индивидуумов, так и числу источников инфекции (рис. 7.2).

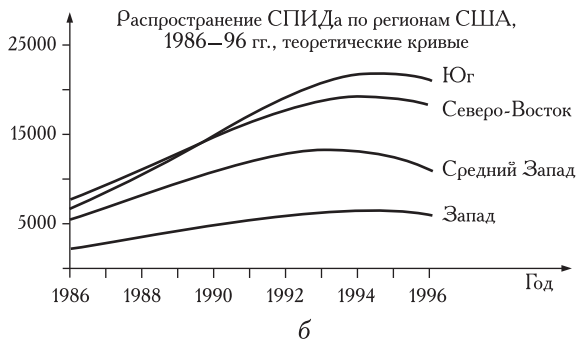
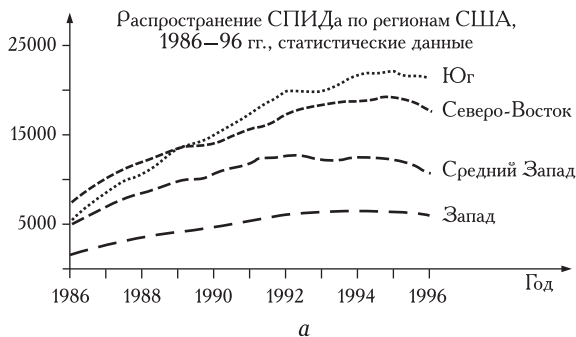
Интересно, что даже, казалось бы, такая простая модель очень хорошо соответствует реальным статистическим данным (см. рис. 7.3), описывающим такой глобальный процесс, как распространение заболевания СПИДом по территории США.

Важно, что в основе простейшей эпидемиологической модели лежит эталонный объект нелинейной динамики — логистическое уравнение, которое в общем случае записывается как

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\mu N(K - N)}{K}, \quad (7.7)$$

где N — величина, характеризующая процесс, $K = N$ при $dN/dt = 0$, t — время, τ — постоянный коэффициент (Короновский и др., 2003).

Рис. 7.3. Эпидемические кривые распространения эпидемии СПИДа по регионам США: a — реальные статистические данные (по материалам the Centers for Disease Control and Prevention, <http://thebody.com/cdc/cdcpage.html>); b — аналитические эпидемиологические кривые $dy/d\tau$, построенные в соответствующих размерных единицах



7.2. Простейшие модели роста численности популяций и народонаселения: экспоненциальный и логистический рост

Попробуем получить логистическое уравнение (7.7) на основе данных о динамике роста численности популяции и народонаселения.

Одна из первых моделей динамики роста популяции принадлежит Томасу Мальтусу. Эта модель, описанная в 1798 г. в работе «Опыт закона о народонаселении» (Malthus, 1798), наверное, является одной из самых первых и простых моделей из всех существующих в биологии, хотя и у нее есть «предшественники» — например, модель, датируемая 1202 г. и принадлежащая Фибоначчи, описывающая динамику популяции кроликов (Воробьёв, 1978). Именно эта модель положила начало изучению последовательности чисел (чисел Фибоначчи), задаваемых соотношением

$$x_{k+1} = x_k + x_{k-1}, x_0 = 1, x_1 = 1,$$

где x_k в модели имеет смысл числа пар кроликов, родившихся в k -ый месяц.

Модель Мальтуса получена при следующих предположениях. Во-первых, несмотря на то, что численность популяции является дискретной величиной (т.е. может изменяться лишь дискретно, скачками, на целое число единиц), будем считать ее непрерывно изменяющейся во времени. Это можно делать только в том случае, если численность популяции достаточно велика — тогда ее изменение на несколько целых единиц можно считать бесконечно малым по сравнению с общей численностью популяции, и тогда мы можем описывать ее динамику на языке производных. Во-вторых, будем считать, что изменение численности популяции в единицу времени прямо пропорционально числу особей в популяции, т.е. чем больше численность популяции, тем больше гибнет и рождается особей в этой популяции в единицу времени. Коэффициент пропорциональности полагается неизменным (в работе Мальтуса это предположение подкреплялось анализом демографической информации). Далее, будем считать, что ресурсы (пространство обитания, пища и т.п.), необходимые для жизни особей рассматриваемой популяции, не ограничены. Тогда математическое описание этой модели выглядит так:

$$\frac{dN}{dt} = \mu N, \quad (7.8)$$

где N — численность популяции, μ — разность между постоянными коэффициентами рождаемости и смертности. Решение уравнения (7.8) предсказывает экспоненциальный рост популяции $N(t) = N(0)e^{\mu t}$, известный как мальтузианский, если $\mu > 0$ (коэффициент рождаемости превышает коэффициент смертности), или, если $\mu < 0$ (смертность превышает рождаемость), — экспоненциальный спад численности популяции до нуля (рис. 7.4). Действительно, если коэффициент μ положителен, то численность популяции с течением времени увеличивается, причем скорость увеличения численности популяции тем больше, чем больше эта самая численность, и следовательно, популяция растет все быстрее, без каких бы то ни было ограничений.

Мальтус, первым получивший подобные результаты применительно к человеческому сообществу, пришел к выводу, что рост численности человеческого общества опережает темпы роста продовольственных запасов, а следовательно, неизбежна жестокая конкуренция среди людей «за место под солнцем». «...Человек, появившийся на свет, уже занятый другими людьми, если он не получил от родителей средств к существованию, если общество не нуждается в его труде, не имеет права требовать для себя пропитания, ибо он лишний на этом свете... На великом пиршестве Природы для него нет прибора. Природа приказывает ему удалиться, и если он не может прибегнуть к состраданию кого-либо из пирующих, она сама принимает меры к тому, чтобы ее приказание было приведено в исполнение».

Понятно, что в реальной жизни никакая биологическая популяция не может расти неограниченно — экологическая система стабилизируется посредством ограничения природных ресурсов. Именно поэтому в 1838 г. Ферхюльст предложил логистическую модель, которая более достоверно, нежели модель Мальтуса (7.8), описывает динамику популяций (Verhulst, 1838.). Отметим, что и уравнение Ферхюльста также имеет «предшественника» — в 1825 г. Б. Гомпертц предложил модель динамики популяции

$$\frac{dN}{dt} = \mu(\ln K - \ln N), \quad (7.9)$$

которая демонстрирует насыщающийся рост (Gompertz, 1825), т.е. с течением времени численность популяции стабилизирует-

Томас Мальтус родился 13 февраля 1766 г. в имении Рукери («Грачевник»), Доркинг (английское графство Суррей), близ города Гилдфорд, в состоятельной дворянской семье. Отец учёного, Дэниел Мальтус, был последователем Давида Юма и Жан-Жака Руссо (с обоими он был лично знаком). В 1784 г. Томас поступил в Джизус-колледж Оксфордского университета, где успешно изучал математику, риторику, латынь и греческий язык. После окончания колледжа некоторое время был в нем членом совета и адъюнкт-профессором. В 1788 г. он был посвящён в духовный сан англиканской церкви, что в те времена не требовало даже формальной веры в бога. В 1796 г. стал священником в городке Олбери (Суррей), в Англии тех лет это означало всего лишь государственную должность со скромной зарплатой и не особо обременительными обязанностями. В 1798 г. он опубликовал свою знаменитую книгу *Essay on the Principle of Population* («Опыт о законе народонаселения»). Мальтус скончался 23 декабря 1834 г. и был похоронен в аббатстве города Бат.



На протяжении всей своей жизни Мальтус жил очень скромно, но последовательно и принципиально отказывался как от высоких государственных должностей, которые ему предлагало правительство, так и от церковной карьеры, считая главным делом своей жизни научную работу. Он был избран одновременно членом Королевского общества и членом Французской академии — честь, которой удостоивались немногие ученые, стал основателем Клуба политической экономии и одним из основателей Лондонского статистического общества. Идеи Мальтуса оказали мощное позитивное воздействие на развитие биологии, во-первых, через их влияние на Дарвина, а, во-вторых, через развитие на их основе математических моделей популяционной биологии, начиная с логистической модели Ферхюльста.

ся на некотором уровне и больше не изменяется. Параметр K в этом уравнении означает максимально возможную численность популяции. Однако эта модель не нашла широкого применения, поскольку логарифмические члены, стоящие в правой части (7.9), не имеют обоснования. Кроме этого кривые, соответствующие реальным зависимостям численностей популяций от времени, быстрее выходят на стационарный уровень, чем это предписывается им моделью Гомпертца.

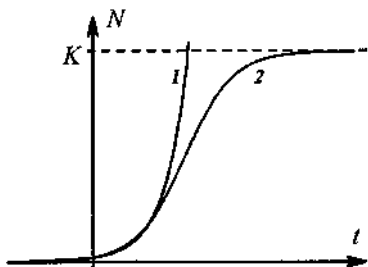
В этом отношении модель, предложенная Ферхюльстом, оказалась более удачной. Ферхюльст предположил, что ресурсы, необходимые для жизнедеятельности особей популяции, огра-

ничены, и на рассматриваемом ареале могут одновременно проживать не более K особей. Величина K не зависит от времени и является параметром модели, который называется емкостью среды. Тогда коэффициент, отвечающий за скорость изменения численности популяции, должен зависеть от числа особей популяции N , причем при малых значениях N , когда численность популяции много меньше емкости среды ($N \ll K$), ограниченность природных ресурсов не будет заметна, а значит, и уравнение, и его решение должны очень мало отличаться от уравнения (7.8) и его решения. Следовательно, при малых N скорость изменения популяции должна быть близка к μN . Но с увеличением численности популяции начинает сказываться ограниченность природных ресурсов, и коэффициент, ответственный за темп прироста популяции, должен уменьшаться, достигая нулевого значения при $N = K$. Уравнение, учитывающее все вышеизложенное, называется уравнением Ферхюльста и совпадает по форме с логистическим уравнением (7.7).

Решение уравнения Ферхюльста показано на рис. 7.4: когда численность популяции мала ($N \ll K$), уравнение (7.7) совпадает с (7.8), и численность популяции нарастает экспоненциально (конечно, при условии, что $\mu > 0$). Но по мере увеличения N начинает сказываться ограниченность природных ресурсов, скорость роста численности популяции уменьшается, и при $t \rightarrow +\infty$ численность популяции N стремится к K , а скорость роста популяции $\dot{N}$ — к нулю.

Несложно показать, что решение уравнения (7.7) в предположении, что при $t = t_0$ численность популяции составляла $N(t_0) = N_0$, можно записать в виде

$$N(t) = \frac{KN_0}{N_0 + (K - N_0)e^{\mu(t_0 - t)}}. \quad (7.10)$$



Кривая, описываемая формулой (7.10), часто называется логистической кривой.

Рис. 7.4. Решение уравнения (7.8) и логистического уравнения (7.7). 1 — неограниченный (экспоненциальный) рост величины N при $\mu > 0$ для уравнения (7.8) (уравнения Мальтуса), 2 — решение (7.7) логистического уравнения (уравнения Ферхюльста)

Пьер Франсуа Ферхюльст (Pierre Fran ois Verhulst) родился 28 октября 1804 г. в Брюсселе, Бельгия. Начальное образование получил в Брюсселе; в 1822 г. поступил в университет Гента, где в 1825 г. получил докторскую степень за работы по теории чисел. На протяжении учебы получил несколько наград за работы по вариационному исчислению. Бельгийская революция 1830 г. и введение датских войск в 1831 г. частично отвлекли Ферхюльста от исследований, но все его политические начинания закончились неудачей, что, однако, не мешало ему в дальнейшем исследовать социальные проблемы с математической точки зрения. Занимался переводом книг по физике, с 1835 г. стал профессором Брюссельского университета, где преподавал астрономию, небесную механику, дифференциальное и интегральное исчисления, теорию вероятности, геометрию и тригонометрию. Интерес к изучению теории вероятности возник у него при наблюдении лотереи, но позже он выразил его применительно к политической экономии и демографическим вопросам. В то время эти области активно развивались благодаря работам Мальтуса и накоплению статистических данных в науках о человеестве. Наиболее известным научным результатом Ферхюльста является формулирование логистического уравнения для численности населения.

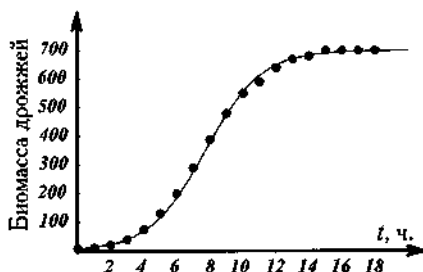


В 1840 г. он становится профессором бельгийского военного университета. За работу по эллиптическим функциям в 1841 г. был выбран членом бельгийской Академии наук. В 1848 г. был избран ее президентом. Но так как на протяжении жизни обладал слабым здоровьем, беспокоившим его многие годы, пробыл в должности всего год, после чего скончался в возрасте 45 лет. Умер Ферхюльст 15 февраля 1849 г. в Брюсселе.

Важно отметить, что уравнение Ферхюльста достаточно хорошо описывает динамику простых биологических систем типа колонии бактерий. На рис. 7.5, взятом из работы (Смит, 1976), представлены зависимость численности колонии бактерий от времени и аппроксимирующее эту зависимость решение логистического уравнения (7.7).

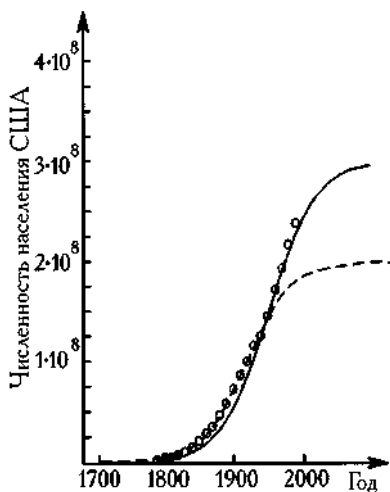
Ясно, что в процессе долгосрочной эволюции па-

Рис 7.5. Зависимость численности колонии бактерий от времени, на которую наложена логистическая кривая (Смит, 1976)



раметры системы могут изменяться (например, под влиянием климатических флуктуаций). В работе (Пригожин и др., 1986) рассматривается понятие логистической эволюции, т.е. процессов, описываемых логистическим уравнением (7.7): «Каждое экологическое равновесие, определяемое логистическим уравнением, носит лишь временный характер, и логистически заданная ниша последовательно заполняется серией видов, каждый из которых вытесняет предшествующих, когда его “способность” к использованию ниши становится больше, чем у них».

Известны попытки описания динамики народонаселения с помощью логистического уравнения. Одной из первых попыток сопоставить результаты, предсказываемые решением логистического уравнения (7.7), и статистические демографические данные была предпринята в 20-е гг. XX в. Раймондом Перлом для Соединенных Штатов Америки (Гиляров, 1998). В момент проведения исследования в начале XX в. казалось, что модель Ферхюльста неплохо описывает динамику численности населения. Однако, как оказалось в дальнейшем, реальные статистические данные хорошо «ложатся» на логистическую кривую только до 40-х гг. XX столетия. Далее, в соответствии с уравнением Ферхюльста, должна наблюдаться стабилизация численности, чего в реальности не происходит — численность населения продолжает расти. Результаты Раймонда Перла показаны на рис. 7.6 пунктирной линией, там же точками отмечены реальные статистические данные по населению США.



Попытка сегодня «подобрать» параметры в логистическом уравнении так, чтобы его решение соответствовало существующим на сегодняшний день статистическим данным, оказывается также безуспешной.

Рис. 7.6. Численность населения Соединенных Штатов (кружки — реальные статистические данные), результаты аппроксимации данных логистической кривой Перлом (пунктирная кривая) в начале XX в. (Гиляров, 1998), а также логистическая кривая, построенная на основе данных о численности населения США до 1990 г. (непрерывная линия)

Так что же, логистическое уравнение не подходит для описания процессов роста численности населения? Конечно, не исключено, что описать такую сложную задачу на стыке демографии и теории глобальных процессов, как рост численности народонаселения целой страны, обыкновенным дифференциальным уравнением 1-го порядка (7.7) с тремя параметрами (пусть даже нелинейным) вообще невозможно. Однако это не так. В главе 9 мы покажем, что путем учета ряда важных факторов и некоторых модификаций модели Ферхюльста можно получить вполне удовлетворительные результаты, хорошо согласующиеся с известными демографическими данными.

7.3. Логистическое уравнение как модель для описания технологического прогресса и динамики человеческого общества

Порой диапазон явлений, которые моделируются с помощью логистического уравнения (или системы мультилогистических уравнений), не может не вызывать удивления. Наиболее ярко это изложено в работе С. Марчетти (Marchetti, 1987), автор которой сводит к логистическому уравнению самые разнообразные явления и процессы. Логистическое уравнение выступает в этой работе как универсальное средство для описания окружающего мира, как «золотой ключик», с помощью которого можно проникнуть в тайны эволюции человеческого общества, получить информацию о прошлом и даже предсказывать будущее. Сделанные выводы весьма любопытны и поражают многообразием.

Так, динамика мирового рынка основных энергетических ресурсов моделируется с помощью системы логистических уравнений:

$$\frac{dN_i}{dt} = K_i N_i + \beta_i^{-1} \sum_{j=1}^n a_{ij} N_i N_j, \quad (7.11)$$

где i — номер рассматриваемого энергоресурса, N_i — его объем, a_{ij} , β_j , K_i — соответствующие константы. Результаты моделирования рынка энергоресурсов приведены на рис. 7.7, где $F = N/K$. Марчетти взял реальные статистические данные о мировом энергетическом рынке за период с 1900 по 1920 г. и на их основе определил соответствующие константы уравнений, а затем продолжил решения логистических уравнений во времени вперед и назад.

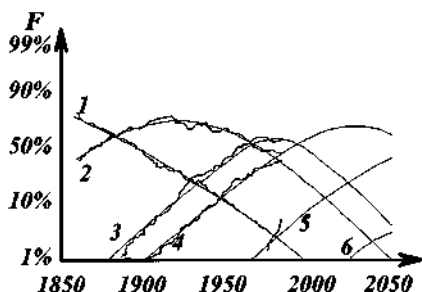


Рис. 7.7. Доля основных энергетических ресурсов (1 — дерево, 2 — уголь, 3 — нефть, 4 — природный газ, 5 — ядерная и 6 — термоядерная энергии) на мировом рынке (в калориях), описываемая системой логистических уравнений. Гладкие линии (они соответствуют логистическим уравнениям) наложены на статистические кривые

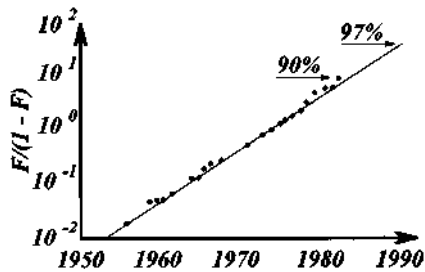
Доли нефти и угля предсказаны на 50 лет вперед (даже после Второй мировой войны) до 1970 г. с точностью до 2—3%. Кроме того, рассматривая более широкую систему уравнений, можно учесть новые виды энергоресурсов (например, ядерную и термоядерную энергию), которые не включают в себя период с 1900 по 1920 г.

Подобное же исследование было проведено и для корабельных двигателей. Были рассмотрены парусные суда, паровые машины и двигатели внутреннего сгорания (дизельные или газовые турбины). И вновь кривые, соответствующие результатам численного моделирования, «ложатся» на кривые статистических данных. Как сказано в работе Марчетти, «соответствие между реальными данными и результатами этой очень простой модели просто замечательное». Не менее «замечательное» совпадение между расчетными и статистическими данными он получает и для конкуренции различных технологий изготовления стали из железа.

Если верить Марчетти, совсем не обязательно решать систему мультилогистических уравнений. Даже простое логистическое уравнение, описывающее модель растущей популяции в замкнутой нише с ограниченными ресурсами и конкуренцией между ее членами, уравнение всего с тремя (!) параметрами, может описывать широчайший круг процессов. Так, статистические данные о числе перевозимых авиапассажиров в отношении к километрам полета находятся в полном соответствии с решением логистического уравнения (см. рис. 7.8). Так как решение логистического уравнения можно записать в виде $F/(1-F) = \exp(\mu t + b)$, где $F = N/K$, то графиком этой зависимости, построенном в логарифмическом масштабе, будет прямая, как это и изображено на рис. 7.8.

Совершенно аналогичные результаты (статистические данные очень хорошо «ложатся» на расчетную прямую) получены и для распространения компьютеров на японском рынке, и для построе-

Рис. 7.8. Число перевозимых авиа-пассажиров в отношении к километрам полета (статистические данные наложены на расчетные)



ния линий метрополитена в разных городах мира, и для запуска железнодорожных линий, и даже для закладки первого камня при постройке готических соборов (этот пример охватывает по времени более четырех веков, и, если верить Марчетти, результаты моделирования находятся в полном соответствии с историческими данными). Более того, если взять основные нововведения, появившиеся за последнюю пару столетий, и отметить даты, когда они появились как продукты рынка, то нововведения, независимо от того, что они собой представляют, являются такими же продуктами, как машины или компьютеры, они развиваются вместе и стремятся занять свою нишу (каждое нововведение считается за один предмет). Открытиям, появляющимся одно за другим, можно поставить в соответствие логистические уравнения и вновь получить совпадение статистических данных с решениями уравнений. Кроме того, каждая серия открытий следует за появлением на рынке нового источника энергии. Даже число людей, убитых Красными бригадами, подчиняется логистическому уравнению.

Следует отметить, что список работ, в которых рассматривается соответствие логистической кривой реальным данным, не исчерпывается вышеупомянутой работой. Так, в книге Ю.М. Плотинского (Плотинский, 1992) приводится зависимость от времени движения протеста в Англии в 1830 г., которое протекало всего лишь месяц — с 8 ноября по 8 декабря 1830 г. Во главе этого движения стоял некий капитан Свинг, который пытался остановить процесс распространения сельскохозяйственной техники (механических молотилок) посредством разрушения этих машин. На графике (рис. 7.9) точками отмечено общее число машин, разрушенных к тому времени. Динамика стихийного протеста вновь хорошо описывается логистической кривой.

Интересно, что аналогичный подход, базирующийся на логистическом уравнении, был предложен для прогнозирования процесса демократизации (Плотинский, 1998; Modelski et al., 1991).

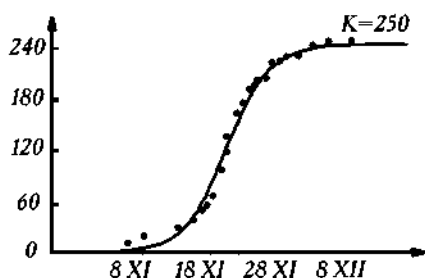


Рис. 7.9. Динамика движения протеста в Англии в 1830 г. Точками показано общее число механических молотилок, уничтоженных к данному моменту, гладкая кривая — решение логистического уравнения. Видно, что значительная часть машин была уничтожена в период с 18 по 28 ноября

По мнению авторов (Modelski et al., 1991), демократия стала распространяться по земному шару в XV в. Первая фаза распространения демократических форм правления — авторы называют ее «экспериментальной» — длилась с 1450 по 1800 г. В это время доля населения, опробовавшая демократические процедуры правления, не превышала 1–2% всего населения Земли. Далее процесс демократизации начал «ускоряться», и к 1990 г. уже 40% населения избрало демократические формы правления. В работе (Modelski et al., 1991) прогнозируется, что к концу XX столетия будет достигнута отметка 50%, а к 2100 г. уже 90% населения будет жить при демократической форме государственного устройства.

Таким образом, логистическое уравнение (простое обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка) в той или иной степени описывает самые различные процессы, протекающие в человеческом обществе. В этом есть что-то удивительное: когда самые различные аспекты глобальных процессов, происходящих в человеческом обществе, эффективно описываются одним весьма простым уравнением. Эффективность данной модели заключается в том, что она описывает типичное поведение систем, в которых существуют как положительные обратные связи, вызывающие первоначальный экспоненциальный рост динамических характеристик, так и естественные ограничения, ставящие предел этому росту. Именно такие процессы типичны для социальных систем. Продолжим обсуждение логистического уравнения на примере очень важного класса моделей, которые используются для качественного анализа различных глобальных процессов в человеческом обществе, в основе которых лежит логистическое уравнение.

7.4. Нелинейные модели Вайдлица и их применение к анализу глобальных экономических и социальных задач

Ярким примером моделей социально-политической динамики являются математические модели Вайдлица, при создании которых использовался макроскопический подход, основанный на «полуколичественных рассуждениях» (Аникин, 2000). К числу несомненных достоинств данной группы моделей следует отнести наглядность, их «прозрачность» для понимания, а также тот факт, что они могут быть применены для качественного описания весьма широкого круга социальных процессов. В основе уравнений, предложенных Вайдлицом, вновь лежит логистическое уравнение.

Введем макропеременные, которые будут характеризовать состояние некоторой социальной системы. Для начала будем рассматривать эти макропеременные абстрактно, полностью пренебрегая их конкретным содержанием. На данном этапе для нас важно лишь то, что этим переменным может быть приписано некое реальное смысловое содержание, они могут быть определены количественно любым способом и принимают непрерывные положительные значения. Будем полагать также, что эти макропеременные могут взаимодействовать друг с другом, а так как они «оторваны от реальной жизни», то и их взаимодействие может быть описано численно, без выяснения и учета социальных механизмов взаимовлияния.

Вполне естественно предположить, что макропеременные могут влиять друг на друга по-разному: к примеру, переменная x может как увеличивать значение переменной y , так и уменьшать его. Разумеется, степень влияния переменной x на переменную y будет зависеть от численных значений этих переменных. Более того, сам характер воздействия переменной x на переменную y (поддержание или подавление) может изменяться и зависеть от величины x . Макропеременная x может — в зависимости от собственной амплитуды — переключаться с подавления переменной y на поддержание и наоборот.

Будем называть переменную x кооперативной по отношению к переменной y , если x стремится увеличить значение y при больших собственных значениях и уменьшить при малых. Иными словами, кооперативная переменная стремится сравнять значение другой переменной, на которую она действует, со своим собственным значением. Но возможен и другой вариант: переменная x будет подавлять переменную y в том случае, если значение x велико,

и усиливать, если значение x мало. Следовательно, переменная x стремится противопоставить величину переменной y своей собственной величине. В этом случае будем называть переменную x антагонистической по отношению к y .

Подобный характер взаимодействия — кооперативный или антагонистический — довольно часто встречается в социальных системах, и, следовательно, данный подход (конечно, памятуя о том, что он существенно идеализирован) можно применять для описания весьма широкого круга явлений.

Будем рассматривать две переменные x и y , которые оказывают друг на друга кооперативное или антагонистическое воздействие. Причем, вполне естественно, что переменная x может, к примеру, оказывать кооперативное воздействие на переменную y , и в то же время переменная y может оказывать антагонистическое влияние на x . Более того, предполагая, что переменные x и y самонасыщающиеся, получим, что наиболее простым типом уравнений, способных содержать взаимодействия кооперативного или антагонистического типа и самонасыщение, скорее всего являются логистические уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= x[a(y) \cdot s - x], \\ \frac{dy}{dt} &= y[b(x) \cdot s - y],\end{aligned}\tag{7.12}$$

где t — безразмерное время, s — регулируемый параметр, характеризующий степень влияния макропеременных друг на друга, а $a(y)$, $b(x)$ — функции влияния, обуславливающие кооперативный или антагонистический характер взаимодействия макропеременных. Уравнения (7.12) могут быть получены непосредственно из рассмотрения динамики поведения отдельных индивидуумов. Рассмотрим две группы индивидуумов $i = 1, 2, \dots, N$ и $j = 1, 2, \dots, M$, чья индивидуальная активность может быть охарактеризована переменными $x_i(t)$ и $y_j(t)$. Более того, пусть

$$\begin{aligned}x(t) &= \sum_{i=1}^N c_i x_i(t), \\ y(t) &= \sum_{j=1}^M d_j y_j(t)\end{aligned}\tag{7.13}$$

являются совокупными переменными, образованными $x_i(t)$ и $y_j(t)$, где c_i и d_j — коэффициенты, описывающие относительный вес $x_i(t)$ и $y_j(t)$ в $x(t)$ и $y(t)$, соответственно. Полагая теперь, что $x_i(t)$ и $y_j(t)$ удовлетворяют микросоотношениям

$$\begin{aligned}\frac{dx_i}{dt} &= x_i F(x, y), \\ \frac{dy_j}{dt} &= y_j G(x, y),\end{aligned}\tag{7.14}$$

легко получить строгие макроуравнения:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= x F(x, y), \\ \frac{dy}{dt} &= y G(x, y).\end{aligned}\tag{7.15}$$

Видно, что уравнения (7.12) являются частными случаями полученных нами строгих макроуравнений (7.15) при выборе:

$$\begin{aligned}F(x, y) &= a(y)s - x, \\ G(x, y) &= b(x)s - y.\end{aligned}\tag{7.16}$$

Следует, однако, заметить, что вид предложенных строгих макроуравнений является весьма специальным: каждая индивидуальная переменная x_i , y_j взаимодействует с любой другой индивидуальной переменной x_k , y_l только посредством совокупных переменных x и y , содержащихся в функциях $F(x, y)$, $G(x, y)$.

Функции влияния $a(y)$ и $b(x)$ В. Вайдлих предлагает выбрать в следующем виде:

- если воздействие y на x кооперативное

$$a(y) = \begin{cases} a_- < 0, & \text{если } 0 < y \leq y_s, \\ a_+ > 0, & \text{если } y_s < y < \infty, \end{cases}\tag{7.17}$$

- если воздействие y на x антагонистическое

$$a(y) = \begin{cases} a_+ > 0, & \text{если } 0 < y \leq y_s, \\ a_- < 0, & \text{если } y_s < y < \infty. \end{cases}\tag{7.18}$$

Соответственно если переменная x оказывает кооперативное влияние на переменную y (рис. 7.10), то

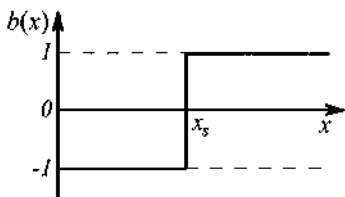


Рис. 7.10. Вид влияния функции $b(x)$ в случае кооперативного характера воздействия макропеременной x на макропеременную y

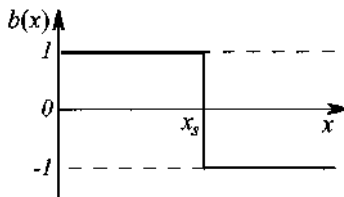


Рис. 7.11. Вид влияния функции $b(x)$ в случае антагонистического характера воздействия макропеременной x на макропеременную y

$$b(x) = \begin{cases} b_- < 0, & \text{если } 0 < x \leq x_s, \\ b_+ > 0, & \text{если } x_s < x < \infty. \end{cases} \quad (7.19)$$

В случае антагонистического взаимодействия x на y (рис. 7.11)

$$b(x) = \begin{cases} b_+ > 0, & \text{если } 0 < x \leq x_s, \\ b_- < 0, & \text{если } x_s < x < \infty. \end{cases} \quad (7.20)$$

Очевидно, что при $y = y_s$ воздействие y на x переключается с подавления на поддержание, согласно (7.17) или (7.18), а при $x = x_s$ воздействие x на y также переключается с подавления на поддержание согласно (7.19) или (7.20). Подобный тип связи уравнений между собой можно назвать пороговым (Короновский и др., 1997).

Нетрудно заметить, что возможны четыре варианта взаимодействия макропеременных между собой:

- 1) переменная x оказывает кооперативное воздействие на y , переменная y кооперативно действует на x (рис. 7.12);
- 2) переменная x оказывает антагонистическое воздействие на y , переменная y антагонистично действует на x (рис. 7.13);
- 3) переменная x оказывает кооперативное воздействие на y , переменная y антагонистично действует на x (рис. 7.14);
- 4) переменная x оказывает антагонистическое воздействие на y , переменная y кооперативно действует на x (рис. 7.15).

В случае «симметричного» характера взаимодействия (случаи 1 и 2) система очень быстро приходит (в зависимости от начальных условий) к одному из двух состояний равновесия, которые являются устойчивыми узлами (рис. 7.14 и рис. 7.15).

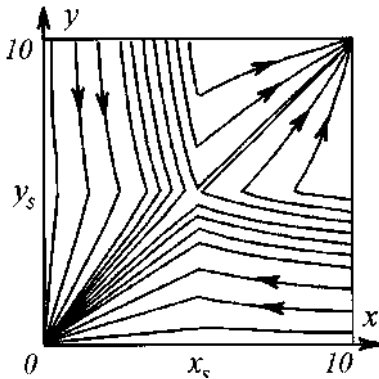


Рис. 7.12. Динамика системы в случае, когда переменная x оказывает кооперативное воздействие на y , а переменная y кооперативно действует на x (рисунок получен при следующих значениях параметров: $x_s = y_s = 5, 0, s = 10$)

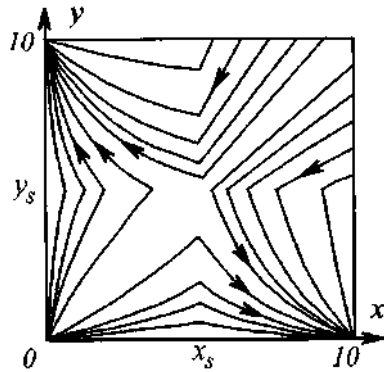


Рис. 7.13. Динамика системы в случае, когда переменная x оказывает antagonистическое воздействие на y , а переменная y antagonистично действует на x

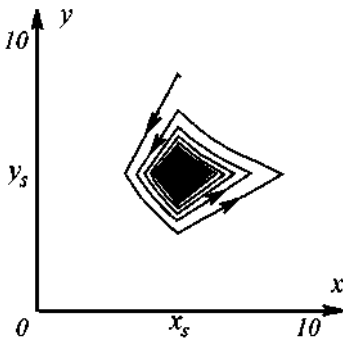


Рис. 7.14. Динамика системы в случае, когда переменная x оказывает кооперативное воздействие на y , а переменная y antagonистично действует на x . Фазовые траектории «скручиваются» к точке (x_s, y_s)

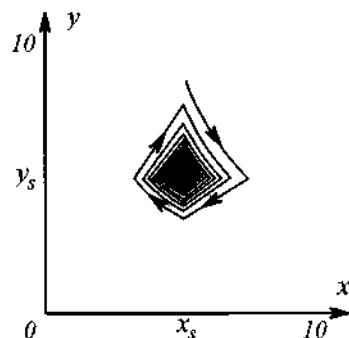


Рис. 7.15. Динамика системы в случае, когда переменная x оказывает antagonистическое воздействие на y , а переменная y кооперативно действует на x . Фазовые траектории «скручиваются» к точке (x_s, y_s)

В «асимметричных» случаях (3 и 4) изображающая точка движется по фазовой плоскости квазициклично, с течением времени приближаясь к устойчивому фокусу (x_s, y_s) (рис. 7.14 и рис. 7.15), причем «интенсивность скручивания» фазовой траектории определяется параметром системы s : чем больше s , тем медленнее затухают колебания, и при $s \rightarrow \infty$ — наблюдаются периодические

незатухающие колебания (в какой-то мере s является аналогом добротности в колебательном контуре с потерями).

Рассмотрим теперь различные интерпретации модели, ведущие к качественному пониманию социальной динамики. Сначала применим модель к отношениям между народом и правительством, чтобы получить понимание возможных динамических режимов.

Применение модели: взаимодействие народа и правительства

Начнем с определения переменных x и y . Пусть x представляет степень воздействия на управление государством и демократического соучастия народа в этом процессе, а y характеризует степень силы и власти правительства (обе переменные могут в принципе быть образованы из взвешенных средних по значениям соответственно выбранных индикаторов).

Следующим шагом должно являться определение взаимодействия между переменными. Очевидно, что вид взаимодействия должен быть оценен из исторического опыта отношений между правительством и народом. Однако модель может давать лишь некоторые динамические последствия предполагаемых взаимодействий. Важным случаем, обнаруженным при анализе отношений внутри политических систем, является случай «кооперативного народа» (x) и «кооперативного правительства» (y). Это означает, что могут наблюдаться следующие конкретные взаимодействия:

- воздействие x на y : если народ влиятелен (большое значение переменной x), то он склонен поддерживать мероприятия правительства; однако если люди практически лишены возможности соучастия (маленькое значение переменной x), то они склонны препятствовать мерам, предпринимаемым правительством;
- воздействие y на x : если правительство обладает силой (большое значение y), тогда оно эффективно в поддержании народа и его соучастии в делах правительства; однако если правительство боится потерять власть (маленькие значения y), то оно пытается подавить влияние народа.

Очевидно, что этот вид взаимодействия может быть отождествлен со случаем (1) для рассматриваемой модели (рис. 7.12). Поэтому предполагается, что подобная политическая система в итоге придет в одно из двух возможных состояний равновесия:

1) или в состояние «демократии согласия» (x велико и y велико), где народ уважает и поддерживает правительство, а правительство поддерживает народ и действует во имя его блага;

2) или в состояние «демократии противостояния» (x мало и y мало), где народ отрицает политику правительства, а правительство подавляет влияние народа.

То, какое из двух состояний равновесия будет достигнуто, зависит от начального состояния $(x_0; y_0)$ системы. Траектории, достигающие точки, соответствующей «демократии согласия», отделены от траекторий, достигающих точки «демократии противостояния», критической сепаратрисой на фазовой плоскости (x, y) .

Теперь возникает вопрос, можно ли воспрепятствовать достижению системой конечного состояния «демократии противостояния» путем изменения некоторых параметров системы. Это действительно возможно за счет изменения точек переключения x_s и y_s : если народ начинает поддерживать правительство, даже обладая малым влиянием (понижение значения x_s), и если правительство не становится репрессивным даже после потери части власти (понижение y_s), границы квадрантов на фазовой плоскости смещаются. Изображающая точка, изначально обреченная прийти к «демократии противостояния», может теперь, при новых параметрах системы, эволюционировать к устойчивому состоянию «демократии согласия».

Существуют попытки объяснить процессы, происходившие в Советском Союзе в конце 80-х гг., как стремление сместить точку переключения во взаимодействии между правительством и народом так, что правительство переключается с подавления на передачу части власти народу, а отношение народа переключается с отрицания политики правительства на поддержание. За счет этого сдвига сепаратрис (изображающая точка) может теперь лежать в области притяжения неподвижной точки «демократия согласия» вместо области притяжения точки «демократия противостояния». В. Вайдлих именно так интерпретирует перестройку по Горбачеву. Мы же предоставляем читателю возможность самостоятельно найти социальную интерпретацию взаимодействия народа и правительства для случая, изображенного на рис. 7.13.

***Применение модели: взаимодействие старой
и новой отраслей промышленности***

Применим теперь рассматриваемую модель к описанию циклов Кондратьева (Меньшиков и др., 1982; Плотинский, 1992; Медоуз и др., 2007). Существует несколько моделей этих циклов, отли-

чающихся предположениями о движущих силах и относящихся к проблеме переменных, но имеющих частично перекрывающиеся интерпретации. Если такие модели свести к сути их допущений, они состоят из некоторых схем взаимодействия между макропеременными.

Покажем, что правдоподобная элементарная модель экономического долгосрочного цикла может быть построена с использованием двух взаимодействующих переменных, одна из которых кооперативного, а другая — антагонистического типа. Объяснение долгосрочных циклов в этой модели дается как конкуренция между новой, «молодой» промышленностью и зрелой, «стареющей» промышленностью. В этом смысле вводятся следующие переменные: x — объем новой, «молодой» промышленности, y — объем зрелой, «стареющей» промышленности.

Понятно, что x действует как кооперативная, а y — как антагонистическая переменная (случай 3, рис. 7.14). При таком выборе переменных и характера их взаимодействия модель демонстрирует квазициклическую динамику, фазы которой можно интерпретировать в терминах циклов Кондратьева.

- **Процветание** ($x > x_s$, $y > y_s$). Процветающая зрелая промышленность (y) поддерживается также процветающими новыми отраслями (x). Но зрелая промышленность y начинает подавлять дальнейшие новшества и разработки, поскольку их основная прибыль дается выпуском апробированной серийной продукции.
- **Спад** ($x < x_s$, $y > y_s$). В то время, как все еще продолжается подавление новых разработок (объем x), недостаток новых тенденций начинает приводить к износу стареющих отраслей (объем y) и приводит к спаду.
- **Депрессия** ($x < x_s$, $y < y_s$). Стареющие отрасли (объем y) становятся ветхими и соскальзывают в кризис. Однако потеря ими сдерживающей силы приводит к возрождению новых отраслей (объем x).
- **Восстановление** ($x > x_s$, $y < y_s$). Поскольку кризис обветшалых отраслей y способствовал подъему сильных новых отраслей x , последние теперь помогают восстановлению основных отраслей.

Применение модели: эволюция модного ресторана

Применим теперь рассматриваемую модель (может быть, несколько в шутку) к квазициклическому явлению из повседневной жизни: пусть городские гурманы обнаружили открытие нового

ресторана, который славится хорошей пищей, и благодаря этому его репутация возрастает. Однако с течением времени репутация этого ресторана ухудшается, так что ресторан должен закрыться, возможно, с последующим открытием новым владельцем.

Объясним теперь это странное явление на языке двух взаимодействующих переменных. Пусть x будет качеством пищи (отнесенным к единице цены), а y — количеству посетителей в ресторане. Можно заметить, что x взаимодействует как кооперативная переменная, а y — как антагонистическая (случай 3, рис. 7.14). Тогда поведение модели можно интерпретировать следующим образом:

- **Открытие** ($x > x_s, y < y_s$). Небольшое количество посетителей y диктует необходимость улучшения качества пищи x . Это приводит к увеличению числа посетителей.
- **Процветание** ($x > x_s, y > y_s$). Благодаря положительным отзывам о пище x число посетителей y увеличивается. Однако это начинает сказываться на качестве пищи, поскольку владелец ресторана становится небрежен, желая извлечь наибольшую прибыль.
- **Спад** ($x < x_s, y > y_s$). Поскольку число посетителей y все еще велико, владелец может позволить еще большее ухудшение качества пищи, однако большинство посетителей начинают беспокоиться, и их число начинает уменьшаться.
- **Депрессия** ($x < x_s, y < y_s$). Теперь у ресторана плохая репутация, и число посетителей y постоянно уменьшается. Даже улучшать теперь качество пищи может быть слишком поздно. Возможно, ресторан должен быть закрыт, а затем вновь открыт новым владельцем, чтобы опять начать с фазы «открытия».

Понятно, что лучше всего посещать рестораны в конце стадии «открытия», когда пища прекрасна, а зал все еще относительно свободен, но ни в коем случае не в конце фазы «спада», когда еда убога, а зал переполнен.

Модификация модели Вайдлиха

Понятно, что нелинейные модели В. Вайдлиха сильно идеализированы: при описании явлений, происходящих в обществе, учитываются лишь два наиболее существенных, по мнению автора, фактора. Этого часто оказывается недостаточно для описания подобных систем.

Будем рассматривать теперь три переменные x , y и z , которые оказывают друг на друга кооперативное или антагонистическое

воздействие (Короновский и др., 1996). Причем, вполне естественно, что переменная x может, к примеру, оказывать кооперативное воздействие на переменную y и в то же самое время антагонистическое — на z . Система эволюционных уравнений, рассматриваемых ниже, имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= x[a(y, z) \cdot s - x], \\ \frac{dy}{dt} &= y[b(x, z) \cdot s - y], \\ \frac{dz}{dt} &= z[c(x, y) \cdot s - z],\end{aligned}\tag{7.21}$$

где t — безразмерное время, s — регулируемый параметр, характеризующий степень влияния макропеременных друг на друга, а $a(y, z)$, $b(x, z)$, $c(x, y)$ — функции влияния, обуславливающие кооперативный или антагонистический характер взаимодействия макропеременных. Эти функции выбраны в виде:

$$\begin{aligned}a(y, z) &= +A_{yx}\text{th}(k(y - y_{sx})) + A_{zx}\text{th}(k(z - z_{sx})), \\ b(x, z) &= +A_{xy}\text{th}(k(x - x_{sy})) + A_{zy}\text{th}(k(z - z_{sy})), \\ c(x, y) &= +A_{xz}\text{th}(k(x - x_{sz})) + A_{yz}\text{th}(k(y - y_{sz})),\end{aligned}\tag{7.22}$$

где x_{sy} , x_{sz} , y_{sx} , y_{sz} , z_{sx} , z_{sy} — точки переключения функций влияния, при пересечении которых происходит изменение характера взаимодействия макропеременных (с подавления на усиление или наоборот). Знак «плюс» перед соответствующей константой, характеризующей интенсивность воздействия данной переменной на другую (A_{yx} , к примеру, характеризует интенсивность воздействия макропеременной y на переменную x), выбирается в том случае, если эта переменная оказывает кооперативное воздействие, и «минус» — если антагонистическое. Нетрудно видеть, что даже при $x_{sy} = x_{sz} = x_s$, $y_{sx} = y_{sz} = y_s$, $z_{sx} = z_{sy} = z_s$ (а именно этот случай, для простоты, мы будем рассматривать в дальнейшем) существует 2^6 различных вариантов взаимодействия между тремя макропеременными. Исследование всех возможных ситуаций — занятие весьма трудоемкое (да и ненужное). Можно существенно упростить задачу, предположив, что все макропеременные имеют одинаковую «интенсивность воздействия», т.е. положив все константы A_{ij} ($i, j = x, y, z$) в функциях влияния равными друг другу.

В этом случае необходимо исследовать всего лишь 16 различных вариантов. Выберем следующие значения параметров: $s = 5$, $k = 1$, $x_s = 4,5$, $y_s = 4,25$, $z_s = 4,1$, $A_{xy} = A_{xz} = A_{yx} = A_{yz} = A_{zx} = A_{zy} = 1$.

Теперь можно приписать макропеременным некоторое конкретное содержание: выделив три основные величины, наиболее полно характеризующие состояние социальной системы (речь идет о моделировании социальных процессов, но, разумеется, можно применять подобный подход и к качественному описанию других процессов, например биологических), и установив характер взаимовлияния между этими величинами (т.е. установив, какими являются взаимосвязи — кооперативными или антагонистическими), можно попытаться качественно описать динамику системы, объяснить на основании этого процессы, протекающие в реальной социальной системе, и с большей или меньшей степенью точности спрогнозировать возможное дальнейшее развитие ситуации, а также указать возможности воздействия на происходящие события.

Не будем подробно рассматривать все возможные случаи (это достаточно подробно описано в работе авторов (Короновский и др., 1996)), а ограничимся рассмотрением лишь тех, которые представляются, на наш взгляд, наиболее интересными. Отметим, что определенный тип взаимодействия макропеременных может соответствовать нескольким различным социальным явлениям и процессам. Кроме того, еще раз дополнительно подчеркнем, что речь идет только о качественном анализе рассматриваемых глобальных процессов.

Применение модели: развитие системы образования в условиях конкуренции

Пусть в некоторой области существуют два учебных заведения одинакового профиля и уровня подготовки. Число лиц, обучающихся в каждом из этих учебных заведений (число «студентов»), будем характеризовать переменными x и y соответственно, а число лиц, желающих поступить в одно из этих учебных заведений (число «абитуриентов») — макропеременной z . Установим характер взаимодействия между введенными макропеременными. Естественнo предположить, что z (число «абитуриентов») оказывает кооперативное воздействие на макропеременные x и y (т.е. на число «студентов» соответствующих учебных заведений): чем больше число «абитуриентов», тем в конечном счете больше сту-

дентов в учебных заведениях, и, наоборот, отсутствие абитуриентов неизбежно ведет к уменьшению числа студентов в учебных заведениях. В свою очередь, макропеременные x и y являются антагонистическими по отношению к z : чем больше студентов в учебных заведениях, тем в большей степени удовлетворена потребность абитуриентов в получении образования, тем большее число лиц перешло из лагеря абитуриентов в лагерь студентов, что, естественно, приводит к уменьшению числа абитуриентов. В случае малого числа студентов (малые x и y) потребность в получении образования у населения остается неудовлетворенной, что приводит к росту числа абитуриентов (к увеличению макропеременной z).

С учетом конкуренции естественно предположить взаимоантагонистический характер взаимодействия между переменными x и y . Действительно, чем большее число студентов обучается в одном из учебных заведений (скажем, x велико), чем лучше идут дела у этого учебного заведения, тем большей популярностью оно пользуется, тем большее число абитуриентов желает учиться именно в этом учебном заведении, что не может не привести к оттоку абитуриентов из конкурирующего учебного заведения и, как следствие, к уменьшению в нем числа студентов (y). И наоборот, чем меньше студентов в учебном заведении, тем меньше престижность этого учебного заведения, что приводит к увеличению числа абитуриентов, желающих поступить в другое учебное заведение.

Как же развиваются события? В зависимости от начальных условий система после переходного процесса приходит к одному из двух устойчивых состояний равновесия: $(x_s^*, 0, z_s^*)$ или $(0, y_s^*, z_s^*)$ (рис. 7.16). Во время переходного процесса (который в реальном времени может быть весьма длительным и занимать, скажем, десятилетия) учебное заведение, дела в котором изна-

чально обстояли хуже (иными словами, изображающая точка в начальный момент времени лежала в бассейне

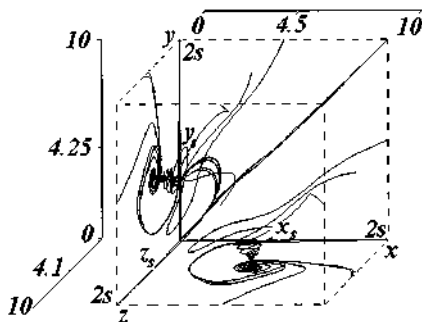


Рис. 7.16. Конкуренция двух учебных заведений, x, y — число студентов в учебных заведениях, z — численность абитуриентов. Показана динамика системы в зависимости от начальных условий ($s = 5,0, x_s = 4,5, y_s = 4,25, z_s = 4,1$)

притяжения аттрактора, соответствующего другому учебному заведению), постоянно теряет студентов отчасти из-за того, что студенты переходят в другое, более престижное заведение, отчасти из-за нежелания абитуриентов поступать в учебное заведение, имеющее плохую репутацию.

Из года в год число студентов, обучающихся в этом учебном заведении, уменьшается, само учебное заведение хиреет и в конце концов вынуждено закрыться. В другом учебном заведении дела идут лучше, оно пользуется популярностью, почти весь поток абитуриентов желает учиться именно в этом учебном заведении, и число студентов этого учебного заведения колеблется около некоего среднего значения (определяемого точкой переключения) в зависимости от числа абитуриентов.

Обратим внимание на следующее обстоятельство: координаты неподвижных точек в фазовом пространстве определяются из решения соответствующих трансцендентных уравнений

$$\begin{aligned}x[a(y,z) \times s - x] &= 0, \\y[b(x,z) \times s - y] &= 0, \\z[c(x,y) \times s - z] &= 0,\end{aligned}\tag{7.23}$$

но, как показывают результаты численного моделирования, получающиеся значения не сильно отличаются от $2s$, x_s , y_s , z_s , соответственно, а при выборе больших k или в случае кусочно-разрывных функций, предложенных Вайдлихом (см. выше), совпадают с ними. Поскольку эти небольшие отличия не играют существенной роли в понимании динамики системы и не существенны для анализа, так как речь идет прежде всего о качественном соответствии, в дальнейшем не будем акцентировать внимание на этих отличиях, хотя помнить о них все-таки стоит. Именно поэтому рядом с величинами x_s , y_s , z_s ставится символ «*».

Устойчивые состояния равновесия в фазовом пространстве разделены сепаратрисными поверхностями, и в зависимости от того, в бассейне притяжения какого аттрактора лежит изображающая точка, соответствующая начальным условиям, система с течением времени приходит к тому или иному устойчивому состоянию равновесия.

Подведем некоторые итоги: в условиях конкуренции из двух учебных заведений выживает то, которое первоначально имело лучшую репутацию. Более того, попытка открыть в области, где уже есть учебное заведение, новое учебное заведение подобного

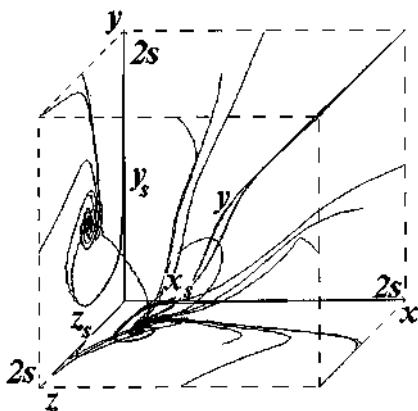


Рис. 7.17. Конкуренция двух учебных заведений. В отличие от рис. 7.16 уменьшено значение точки переключения x_s ($x_s = 1,25$): большинство фазовых траекторий «стягиваются» к устойчивому фокусу $(x_s^*, 0, z_s^*)$

же профиля и качества образования, по всей видимости, заранее обречена на неудачу. Но как же быть руководству того учебного заведения, которому уготована печальная участь быть закрытым? Ответ

можно дать исходя из анализа построенной модели: поверхность, разделяющая бассейны притяжения аттракторов, проходит через точку переключения (x_s, y_s, z_s) . Необходимо расширить границы бассейна притяжения аттрактора, соответствующего данному учебному заведению (рис. 7.17). Для этого необходимо уменьшить значение той координаты точки переключения, которая отвечает за это учебное заведение (на рисунке это x_s). При этом существенно расширяется бассейн притяжения устойчивого фокуса $(x_s^*, 0, z_s^*)$. Иными словами, нужно стараться всячески уменьшить значение числа студентов в данном учебном заведении, при достижении которого функция влияния начинает оказывать подавляющее воздействие на конкурента. Не следует гнаться за количеством студентов — следует обращать повышенное внимание на качество обучения, на репутацию учебного заведения. Вполне возможно, что, изменив параметры системы, можно переломить ход событий, изменив ситуацию в пользу данного учебного заведения.

Применение модели: **формирование общественного мнения**

Полученные результаты в достаточной степени правдоподобны и по крайней мере не противоречат здравому смыслу. Попробуем применить этот же подход к анализу другой социальной ситуации, смоделировав процесс формирования общественного мнения.

Пусть существуют две партии, имеющие различные позиции (а, может быть, и прямо противоположные) по какому-либо «животрепещущему» вопросу. Заметим, однако, что не стоит ограничивать себя пониманием слова «партия» как жесткой

общественно-политической структуры со строгим членством, уставом, внутренней иерархией, программными документами и т.д. В данном случае вполне возможно (и, может быть, даже необходимо) понимать слово «партия» как позицию, как мнение, точку зрения части населения по тому или иному вопросу. Однако в дальнейшем, для краткости, будем употреблять все-таки слово «партия». Пусть, далее, x и z — «влиятельность» или «вес» каждой партии (или, опять-таки, «вес» части населения, поддерживающей ту или иную позицию), а y — «вес» группы людей, не поддерживающих ни то, ни другое направление. (Под словом «вес» можно понимать прежде всего численность партии, хотя это и не совсем верно, ибо влияние партии (группы людей) зависит не только от ее численности, но и от активности ее членов; поэтому под словом «вес» правильнее будет понимать совокупность всех этих факторов.)

Представляется вполне очевидным, что отношения между партиями и политически пассивной частью населения взаимоотношения антагонистические: чем больше людей проявили ту или иную позицию, тем меньше оказывается численность (и, следовательно, «вес») «болота», не имеющего определенного мнения, и наоборот. Партии же могут оказывать друг на друга как кооперативное, так и антагонистическое влияние. Так, если в партии, описываемой переменной x , число членов растет по мере того, как члены другой партии разочаровываются в своих взглядах, переходя на сторону противника, и, наоборот, уменьшается по мере роста влияния и популярности партии, характеризуемой переменной z , то ясно, что z является антагонистической переменной по отношению к x .

Но вполне возможна и иная ситуация: руководство партии, которой соответствует z , «благодушествует» и не предпринимает никаких активных действий, пока партия противников имеет малый «вес» и не пользуется популярностью, но развивает бурную политическую деятельность, как только у противников дела идут на лад и число членов их партии увеличивается. В этом случае x является кооперативной переменной по отношению к z . Представляется весьма вероятным, что именно второй тип взаимодействия характерен для России, где традиционными являются действия по принципу «пока гром не грянет...».

Рассмотрим вышеописанную ситуацию (рис. 7.18). Как видим, возможны два варианта развития событий в зависимости от начальных условий. Если изначально большая часть населения пассивна, то обе партии теряют своих и без того немногочисленных

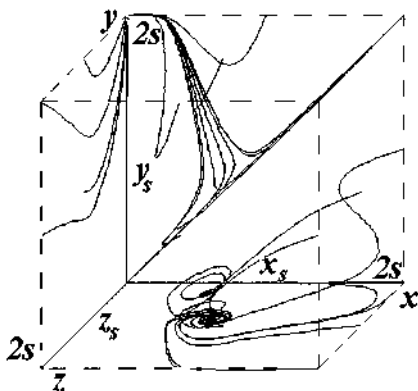


Рис. 7.18. Взаимодействие двух партий, одна из которых оказывает кооперативное влияние на другую партию, а вторая — антагонистическое. Показана динамика системы в зависимости от начальных условий

сторонников, и система очень быстро приходит в состояние равновесия (устойчивый узел $(0, 2s^*, 0)$), что соответствует случаю, когда почти все население проявляет полное

безразличие к политике и не поддерживает ни ту, ни другую партию. Но если вес политически активной части населения велик, ситуация развивается по другому сценарию: в течение переходного процесса (который, опять-таки, может быть весьма продолжительным) все большее число людей втягивается в политическую деятельность, в системе происходят квазициклические колебания, число сторонников и «вес» обеих партий постоянно изменяются (часть населения не имеет четко определенной позиции и, «шаркаясь» из стороны в сторону, поддерживает то одну, то другую партию), и в итоге все население оказывается вовлеченным в политическую деятельность (в той или иной степени, разумеется) и отдает свои симпатии какой-либо из партий (в фазовом пространстве это соответствует устойчивому фокусу $(x_s^*, 0, z_s^*)$).

Но возможно и иное развитие ситуации, если обе партии «российского» типа, т.е. характер взаимодействия между ними взаимосооперативный (рис. 7.19). Если большинство населения не проявляет политической активности, то ситуация развивается в точности так же как и в предыдущем случае $((0, 2s^*, 0) — \text{устойчивый узел})$. Хуже, если общество

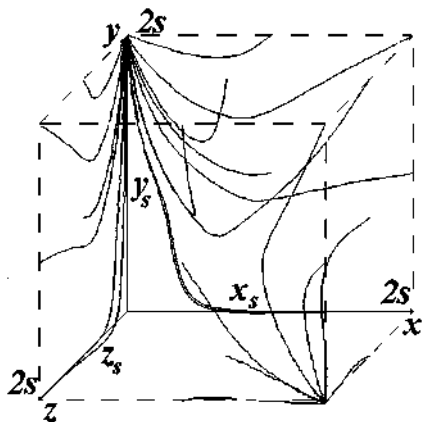


Рис. 7.19. Взаимодействие двух партий, оказывающих друг на друга кооперативное воздействие: x и z — «влиятельность» партий, y — «вес» пассивной части населения

политизировано, население взбудоражено: в этом случае обе партии начинают активно вербовать сторонников, и система очень быстро приходит в состояние максимальной поляризованности: все общество оказывается «расколотым» на две части, причем вес обеих партий оказывается гораздо выше, чем в предыдущем случае. Более того, в этом случае в системе отсутствуют какие то бы ни было колебательные движения. Все это говорит о серьезности намерений сторон: каждый индивидуум твердо уверен в собственной правоте и не меняет своей позиции, готов до конца поддерживать интересы своей партии. Излишне говорить, что подобное положение вещей чревато весьма серьезными и печальными последствиями.

Применение модели: эволюционирующий рынок

В заключение рассмотрим ситуацию, которая представляется наиболее интересной как с точки зрения описания глобальных социальных явлений, так и богатства наблюдаемых режимов. Рассмотрим ситуацию, к которой может быть применена данная модель, а именно процессы, происходящие на рынке ценных бумаг.

Пусть цена некоторого вида ценных бумаг (скажем, неких акций) характеризуется переменной z ; спрос на акции (количество акций, которое желает приобрести население в данный момент) — переменной x , а предложение акций — переменной y .

Установим характер взаимосвязей между макропеременными. Естественнo предположить, что с увеличением цены акций спрос на них уменьшается, а предложение, наоборот, увеличивается, что свидетельствует об антагонистическом воздействии переменной z на переменную x и кооперативном воздействии z на y . В то же время при большом спросе на акции (x велико) цена на них растет, а при большом предложении (y велико) — падает, т.е. x кооперативно действует на переменную z , тогда как y является антагонистической переменной по отношению к z . Разумно считать, что взаимодействие переменных x и y носит взаимоантагонистический характер, что обуславливается прежде всего психологическими причинами: действительно, кто же решится продать свои акции, если их очень охотно раскупают? Но зачем покупать акции, если от них активно избавляются акционеры?

Рассмотрим динамику системы более подробно: при малых значениях параметра s (при указанных выбранных значениях остальных параметров это соответствует $s < 6$) в фазовом пространстве

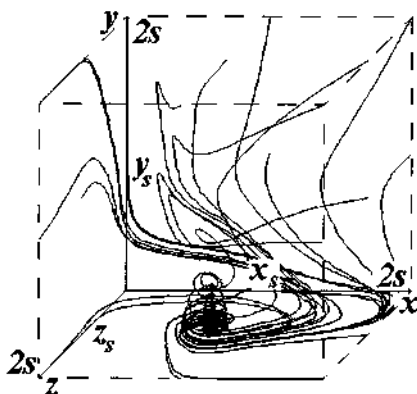


Рис. 7.20. Эволюционирующий рынок: x характеризует спрос, y — предложение, z — цену на акции в данный момент. Независимо от начальных условий в системе устанавливается равновесие между спросом, предложением и ценой ($s = 5$, $x_s = 4,5$, $y_s = 4,25$, $z_s = 4,1$)

существует устойчивый фокус (x_s^*, y_s^*, z_s^*) , где $y^* = y^*(s)$ (рис. 7.20). С увеличением параметра s значение y^* также увеличивается, и при $s = 6,2$,

как свидетельствуют результаты численного моделирования, неподвижная точка теряет устойчивость, происходит бифуркация Андронова-Хопфа, сопровождающаяся рождением предельного цикла (рис. 7.21). Дальнейшее увеличение параметра s приводит к увеличению амплитуды периодических колебаний. При достаточно больших фиксированных значениях параметра s ($s = 25$) увеличение параметра z_s приводит к переходу от периодических колебаний к хаотическим по сценарию Фейгенбаума через каскад бифуркаций удвоения периода (рис. 7.21, $a-z$, рис. 7.22).

В данной интерпретации параметр s можно рассматривать как меру активности населения на рынке ценных бумаг: малые значения s соответствуют нормальной жизни фондового рынка, когда ситуация находится в руках профессионалов; средние значения s ($s \sim 10$) — повышенной активности и большие — ажиотажу, когда только уж совсем ленивый не втянут в куплю-продажу акций.

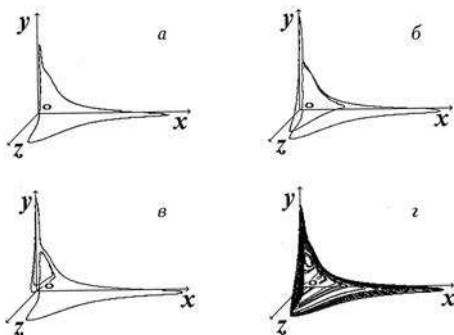
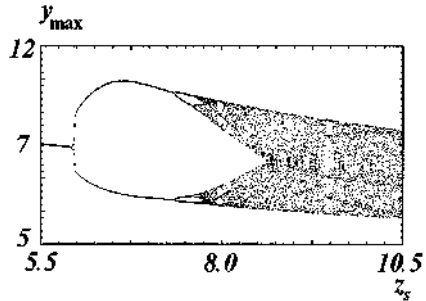


Рис. 7.21. Эволюционирующий рынок: a — в системе существуют периодические колебания ($s = 25$, $x_s = 4,5$, $y_s = 4,25$, $z_s = 5,5$); $б$ — первое удвоение периода. Цикл периода один теряет устойчивость, на его базе рождается цикл периода два ($z_s = 6,2$); $в$ — поведению системы в фазовом пространстве соответствует цикл периода четыре ($z_s = 3,4$); $г$ — хаотическая динамика, в фазовом пространстве существует странный аттрактор ($z_s = 8,8$)

Рис. 7.22. Бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая переход к хаосу через каскад бифуркаций удвоения периода при медленном изменении бифуркационного параметра z_s



Безусловно, параметр s является частично и мерой экономической грамотности и информированности населения.

При малых s в системе происходят затухающие колебания, и по завершении переходного процесса устанавливается некоторое соотношение между спросом, предложением и ценой (рис. 7.20). При увеличении значения параметра s в системе возникают периодические колебания (рис. 7.21, *a*), амплитуда которых зависит от величины s и которые соответствуют следующим процессам: пусть в некоторый отрезок времени x велико, а y и z — малы, т.е. существует большой спрос на акции, цена и предложение которых на рынке невелики. Так как спрос велик, а предложение мало, то цена на акции начинает расти (z увеличивается), что приводит к уменьшению спроса. При достижении некоторой максимальной цены спрос падает почти до нуля, а предложение возрастает, что не может не привести к уменьшению цены на акции. При максимальном предложении и малом спросе цена акции оказывается малой, что ведет к уменьшению предложения и стимулирует увеличение спроса, после чего все повторяется сначала. Заметим, что ситуация, в зависимости от параметров, может повторяться не «буквально», а лишь «в общих чертах» (в случае хаотической динамики, рис. 7.21, *z*), что не только не противоречит здравому смыслу, но и кажется вполне соответствующим действительности.

Возможности интерпретации модифицированных уравнений Вайдлиха далеко не ограничиваются приведенными примерами. Разумеется, систему уравнений можно еще более усложнить: увеличить число переменных, «развязать» параметры (т.е. положить $x_{sz}^{-1} x_{sy}, A_{xy}^{-1} A_{xz}$ и т.д.). Конечно, система станет более сложной, потеряет свою наглядность, и исследовать ее будет гораздо сложнее.

Таким образом, логистическое уравнение и модели, основанные на этом замечательном эталонном уравнении нелинейной динамики, оказываются весьма эффективными для моделирования и описания различных аспектов глобальных процессов в динамике природы и общества.

Литература к главе 7

- Аникин А.В. В. Леонтьев, или Экономика на шахматной доске // Природа. 2000. № 7.
- Воробьев Н.Н. Числа Фибоначчи. М.: Наука, 1978.
- Гиляров А.М. Экология, обретающая статус науки // Природа. 1998. № 2.
- Короновский А.А., Пономаренко В.И., Трубецков Д.И. Динамика отображений с пороговым типом связи // Изв. вузов «Прикладная нелинейная динамика». 1997. № 5.
- Короновский А.А., Трубецков Д.И. Использование модифицированных уравнений Вайдлица для моделирования социальных процессов // Там же. 1996. № 4.
- Короновский А.А., Трубецков Д.И. Нелинейная динамика в действии. Саратов, 2003.
- Медоуз Д., Рандерс Й., Медоуз Д. Пределы роста. Тридцать лет спустя. М.: Академкнига, 2007.
- Меньшиков С.М., Клименко Л.А. Длинные волны в экономике. Когда общество меняет кожу. М.: Межд. отношения, 1982.
- Плотинский Ю.М. Математическое моделирование динамики социальных процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992.
- Плотинский Ю.М. Теоретические и эмпирические модели социальных процессов. М.: Логос, 1998.
- Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. М.: Мир, 1986.
- Смит Дж.М. Модели в экологии. М.: Мир, 1976.
- Gompertz B. On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality // Phil. Trans. 1825. N 115.
- Malthus T.R. An essay on the principle of population. London: Johnson, 1798.
- Marchetti C. The Future. 26 — Rendiconti S.I.F. 1987. XCIX.
- Meadows D., Randers J., Meadows D. Limits to Growth, The 30 Year Update. Chelsea Green Publishing Company. White River Junction, Vermont, 2002.
- Modelski G., Perry G. Democratization in Long Perspective // Tecnological Forecasting and Social Change. 1991. N 39.
- Verhulst P.F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement // Corresp. Math. et. Phys. 1838. N 10.



ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ОПИСЫВАЕМЫЕ МОДЕЛЬЮ ЛОТКИ-ВОЛЬТЕРРЫ И СХОДНЫМИ С НЕЙ

В романе Берхарда Шлинка «Возвращение» (СПб.: Азбука — классика, 2010) есть замечательная фраза: «...при решении юридических казусов, как и при постановке врачом диагноза или во время опытов, проводимых химиком, решающую роль играет распознавание типовых моделей». Одна из таких типовых моделей (в нелинейной науке их чаще называют эталонными) рассмотрена в главе 7.

В настоящей главе описан феномен другой эталонной модели — модели Лотки-Вольтерры, которую часто называют «хищник-жертва». Эта модель и сходные с ней применимы для описания различных процессов в биологии, экологии, медицине, в социальных исследованиях, в истории, радиофизике и в других науках.

Ниже обсуждаются следующие модели: модели взаимодействия загрязнения с окружающей средой; модель классовой борьбы; модель бесклассового общества эпохи охотников-собирателей; модель военных действий; вирусная модель инфекционного заболевания; модель распространения эпидемий, включая модель заражения вирусом компьютеров; модель взаимодействия когнитивных и/или эмоциональных мод мозга.

8.1. Вводные замечания на основе экологических примеров

По своей сути модель Лотки-Вольтерры есть математическое описание дарвинского принципа борьбы за существование, который Чарльз Дарвин в своей автобиографии (Darvin, 1958) излагает следующим образом: «Изучив множество обстоятельств, я пришел к выводу о существовании борьбы за существование. Однажды пришло мне в голову, что при подобных обстоятельствах благоприятные виды продолжили бы развиваться дальше, а неблагоприятные исчезли бы с лица Земли. Вот сейчас у меня и возникла теория, которой следует руководствоваться» (цит. по: Браун, 2009).

Путь, которым шел Дарвин, хорошо описан в книге (Браун, 2009). Любопытно, что Дарвин окончательно уверился в своих выводах после прочтения книги «Опыт о законе народонаселения» Томаса Роберта Мальтуса (Malthus, 1798). Это эссе сыграло важную роль в социальной и политической жизни Британии в 90-е гг. XVIII в., поскольку его воспринимали как разумное осмысление естественных законов общества. В 30-е гг. XIX в. мальтузианские доктрины подавляли проведение правительственной политики. Напомним доводы Мальтуса, которые удивительно просты. Поскольку, по словам Мальтуса, у человечества есть естественная склонность к увеличению рода, производство пищи не могло оставаться на прежнем уровне.

Процитируем далее (Браун, 2009).

«Хотя приблизительный баланс существует, как утверждал автор, некоторое количество людей погибает в результате природных факторов (голода или болезней) или человеческих действий (войны, сексуальные воздержания или греховные поступки, например, детоубийство). Это необходимо ради общего баланса существования.

Мальтус пошел дальше, утверждая: ...данная участь (гибель) — удел самого слабого, самого бедного и самого больного члена общества. Избежать уготованной судьбы не представляется возможным, на то есть воля Бога. Напрашивался один простой вывод, но автор предостерегал о нем: если дать нищим милостыню, то человеческий род будет увеличиваться, появится и нехватка пищи».

Викторианское время, казалось бы, подтвердило правоту Мальтуса. Возникли мятежи, связанные с недостатком еды, дискуссии о «Законе о бедных» и общественная реакция на «Хлебные законы». В 1834 г. викторианские правящие круги в ответ на поправки к «Закону о бедных» как альтернативу церковным благотворительным обществам организовали работные дома, где люди работали за хлеб и воду.

Дарвин жил в этом мире, был его представителем и вращался в одинаковых с Мальтусом кругах. Он распространяет идеи Мальтуса на все живое: в природе идет борьба за жизнь, борьба за существование, в которой худший и слабейший организм погибает первым, а побеждают более развитые формы, более здоровые и приспособленные. Именно эти особи дают потомство. Организмы быстрее адаптируются к условиям окружающей среды, если подобные случаи борьбы повторяются через некоторые промежутки времени.

Начнем дальнейшее изложение (в качестве напоминания) с моделей взаимодействующих популяций — первых математических моделей Лотки (Lotka, 1925) и Вольтерры (Вольтерра, 1976). Будем следовать в изложении главе 9 книги (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010), поскольку это удобно для дальнейшего описания моделей взаимодействия загрязнения с окружающей средой.

Авторы (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) указывают в первую очередь на работу Вольтерры (Вольтерра, 1976), замечая, что аналогичная модель «была предложена Лоткой (Lotka, 1925) несколько ранее (Вольтерра значительно более полно провел анализ этой системы. Лотка каждый раз старался подчеркнуть свой приоритет в записи этой модели)».

Модель Лотки-Вольтерры описывает взаимодействие двух видов — популяции хищников и популяции жертв.

Пусть $N(t)$ — численность жертв, $P(t)$ — численность хищников в момент t . Тогда модель Лотки-Вольтерры имеет вид:

$$\frac{dN}{dt} = aN - bNP, \quad \frac{dP}{dt} = -dP + cNP, \quad (8.1)$$

a, b, c, d — положительные постоянные.

Напомним, что система уравнений (8.1) основана на следующих допущениях:

- при отсутствии хищников жертвы размножаются неограниченно согласно уравнению $dN/dt = aN$, которое называют иногда уравнением Мальтуса;
- хищники при отсутствии жертв вымирают согласно уравнению $dP/dt = -dP$;
- слагаемые, пропорциональные произведению NP , рассматриваются как превращение энергии одного источника в энергию другого (эффект влияния популяции хищников на популяцию жертв, т.е. результат их встречи состоит в уменьшении скорости прироста dN/dt численности жертв на величину NP , пропорциональную численности хищников).

Если ввести новые переменные

$$u(\tau) = \frac{N(t)d}{c}, \quad v(\tau) = \frac{P(t)b}{a}, \quad \tau = at, \quad \gamma = \frac{c}{d},$$

то система уравнений (8.1) примет вид

$$\frac{du}{d\tau} = u - uv, \quad \frac{dv}{d\tau} = \gamma v(u - 1). \quad (8.2)$$

Система уравнений (8.2) имеет две неподвижные точки: $(0, 0)$ — седло и $(1, 1)$, для которой собственные значения матрицы Якоби

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ \gamma & 0 \end{pmatrix} \text{ являются мнимыми: } \lambda_{1,2} = \pm i\sqrt{\gamma}, i = \sqrt{-1},$$

т.е. положение равновесия $(1, 1)$ негиперболическое и сделать вывод о его устойчивости на основе линейного анализа нельзя.

Фазовые траектории системы уравнений (8.2), как известно, являются интегральными кривыми уравнения

$$\frac{dv}{du} = \gamma \frac{(u-1)v}{(1-v)u},$$

решение которого

$$\gamma u + v - \ln u^\gamma v = H. \quad (8.3)$$

Можно показать (см., например, Вольтерра, 1976, Базыкин А.Д., 2003), что вблизи $(1, 1)$ линии уровня функции H представляют собой замкнутые кривые, соответствующие периодическим решениям системы уравнений (8.2) (рис. 8.1). Постоянная H в выражении (8.3) определяется начальными условиями, например, $u(0) = u_0$ и $v(0) = v_0$.

Математическая модель, описываемая системой уравнений (8.2), структурно неустойчива, т.е. малое изменение правых частей в ней может приводить к качественному изменению решения. В этом её основной недостаток, более того, именно поэтому трудно говорить о совпадении теории с экспериментом.

Одна из причин структурной неустойчивости модели в том, что она является консервативной, т.е. имеет первый интеграл. Как подчеркивают авторы книги (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010),

несмотря на указанный основной недостаток модели, система уравнений (8.1) позволяет сделать нетривиальные выводы, подтвержденные многочисленными наблюдениями. В частности, в (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) сформулирован принцип Вольтерры: если в системе «хищник—жертва», описываемой моделью (8.1), оба вида истребляются равномерно и пропорционально числу их индивидуумов, то

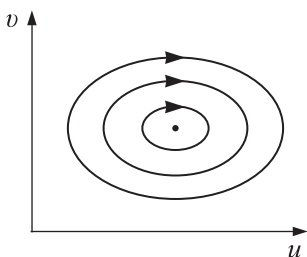


Рис. 8.1. Фазовые траектории, соответствующие соотношению (8.2)

среднее число жертв возрастает, а среднее число хищников убывает.

В книге (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) приведены два примера существования этого эффекта в природе. Один — общественный факт, который привел Вольтерру к его теории борьбы за существование (Вольтерра, 1976): во время Первой мировой войны лов рыбы в Адриатическом море был сильно сокращен, что, к удивлению биологов, привело к увеличению хищников и уменьшению числа жертв. Второй пример менее известен. Согласно (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010), принцип Вольтерры показывает двойственный характер применения средств от насекомых (инсектицидов) для сохранения урожая на полях. Почти все такие химические вещества действуют не только на вредителей, но и на их естественных врагов, что зачастую приводит к увеличению числа вредителей и уменьшению, например, птиц, питающихся этими вредителями. Таким образом, согласно принципу Вольтерры, в экосистеме «хищник—жертва» популяция жертв более чувствительна к процессу пропорционального уменьшения особей в популяции.

В терминологии В.И. Арнольда модель, описываемая системой уравнений (8.1), называется «жесткой» (Арнольд, 1998). Кстати, раздел книги В.И. Арнольда «Жесткие» и «мягкие» математические модели (М.: МЦНО, 2000) называется «Жесткие модели как путь к ошибочным предсказаниям». При малом изменении модели она становится мягкой, когда к правым частям (8.1) добавляются малые слагаемые, учитывающие, например, конкуренцию жертв за пищу или хищников за жертв (конкретные виды уравнений приведем ниже). Тогда в общем виде уравнения (8.1) можно переписать так:

$$\frac{dN}{dt} = aN - bPN + \varepsilon f(P, N), \quad \frac{dP}{dt} = -dP + cPN + \varepsilon g(P, N), \quad \varepsilon = 1.$$

В зависимости от малых поправок $\varepsilon f(P, N)$ и $\varepsilon g(P, N)$ возможны, например, сценарии, показанные на рис. 8.2.

В смысле интерпретации интересен рис. 8.2, б. По Арнольду, если P — бандиты, а N — трудящиеся, эволюция системы приводит то к резкому увеличению числа бандитов, то к их почти полному вымиранию, поскольку они настолько ограбили трудящихся, что взять уже нечего. Система в конечном счете попадает в область столь больших или столь малых значений P и N , что модель

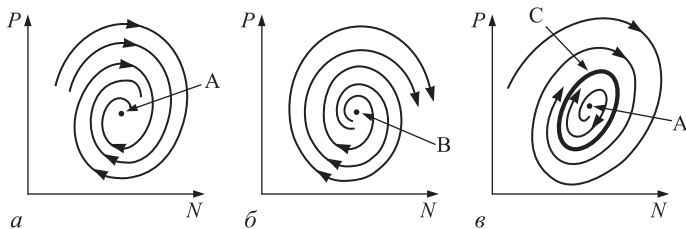


Рис. 8.2:

а — состояние равновесия устойчиво: при любых начальных условиях через большое время устанавливается оно же; б — состояние равновесия В неустойчиво: система идет «вразнос»; в — в системе с неустойчивым стационарным состоянием А устанавливается с течением времени периодический режим С (в отличие от системы (8.1) (см. рис. 8.1), имеют место колебания определенной амплитуды, не зависящей от малости отклонения)

становится неприменимой, поскольку изменяются законы эволюции.

Ситуацию «загрязнение—природа» можно трактовать как частный случай модели «хищник—жертва», когда природа выступает в качестве жертвы, а загрязнение — хищника. Главное предположение, лежащее в основе модели, состоит в том, что окружающая среда активно поглощает и перерабатывает загрязнение вплоть до определенного предела.

Из качественных соображений в системе окружающая среда — загрязнение возможны три следующих принципиально различных сценария взаимодействия.

1. При малых выбросах загрязнения окружающая среда его полностью перерабатывает (устойчивая ситуация).

2. При увеличении выбросов загрязнения в зависимости от внешних условий и случайных причин окружающая среда может находиться в удовлетворительном состоянии, а может и погибнуть (бистабильная ситуация)¹.

3. Третья ситуация соответствует экологической катастрофе — полному вымиранию природы.

Если рассматривать загрязнитель как «жертву», а биологически активный ил как «хищника», то процесс биохимического окисления загрязнителя можно трактовать как «поедание» его микроорганизмами ила.

¹ Бистабильная ситуация может реализоваться, когда в окрестности некоторых предприятий растительный покров остается только местами. Это следует из наблюдений и может служить во многом запоздалым сигналом для принятия срочных мер по спасению природы.

Для читателя, которого интересует математическая сторона вопроса, соответствующие математические модели указанных ситуаций и их анализ приведены в Приложении 1 к данной главе.

8.2. Моделирование классовой борьбы

Запишем уравнения модели «хищник—жертва» в виде следующей системы:

$$\frac{dx}{dt} = a(y_1 - y)x, \quad \frac{dy}{dt} = -b(x - x_1)y, \quad (8.4)$$

где x , y — численность популяций, x_1 и y_1 — их стационарные значения, a и b — постоянные.

Эта модель используется для описания малых городских ареалов (Занг, 1999). В этом случае переменная x в системе уравнений (8.4) означает площадь землепользования, y — земельную ренту, a , b , x_1 , y_1 — некоторые параметры.

Интересное приложение модели для описания классовой борьбы дано Гудвином (Занг, 1999), (Goodwin, 1997), где рассмотрены два типа граждан: рабочие и капиталисты. Подробное описание модели и ее анализ даны в Приложении 2. Главный вывод Гудвина: полученные им уравнения совпадают с уравнениями (8.4), если x — коэффициент занятости трудящихся, а y — доля затрат на оплату труда.

Заметим, что модель Гудвина, учитывающая взаимодействие между уровнем занятости и законодательно установленной долей отчислений на оплату труда, весьма напоминает классические модели политической экономии (её иногда называют неомарксистской). Модель вновь привлекает внимание к трудам экономистов-классиков, таких как Риккардо, Смит, Маркс. Увы, модель структурно неустойчива.

Итак, модель «хищник»—«жертва» может быть использована для моделирования явлений взаимосвязи городской земельной ренты и интенсивности землепользования, безработицы и динамики экономического роста.

8.3. Модель описания бесклассового общества

Для этой эпохи характерна низкая плотность населения и общинная (родовая) организация человеческого сообщества. Че-

ловек полностью зависел от природы, шла постоянная борьба за выживание, а главным из добываемых ресурсов была пища. Человек был частью экосистемы и отличался от других стайных хищников по-существу лишь умением использовать для собственных нужд огонь и примитивные орудия труда. Изменение численности населения в конкретном ареале в основном определялось состоянием ресурсной базы и может быть описано моделью «хищник—жертва» — системой уравнений (8.1). Теперь в этих уравнениях N — численность популяции объектов охоты («жертв»); P — численность древних охотников («хищников») в рассматриваемом ареале; cNP — скорость рождения «хищников»; dP — смертность «хищников»; aN — скорость гибели «жертв» (считается, что их пищевая база не ограничена); bNP — скорость гибели «жертв» за счет их истребления «хищниками» (считается, что это единственная причина смертности «жертв»). Решения этих уравнений анализировались в разд. 8.1). Поскольку охотники-собиратели потребляли то, что было произведено в природе без их участия, численность популяции определялась внешними условиями, повлиять на которые они не могли (в модели численность охотников-собирателей колеблется около среднего значения $P_0 = a/b$). Заметим, что именно этим объясняется относительная стабильность численности населения Земли на протяжении всего каменного века до эпохи неолита.

Когда человек приручил животных и научился возделывать культурные растения, он превратился из охотника-собирателя в скотовода и земледельца. Таким образом, значительно увеличился коэффициент a , и равновесная численность людей, поскольку величина коэффициента b , характеризующего потребление, осталась примерно на прежнем уровне.

8.4. Модели военных действий

В книге (Lanchester, 1916) Фредерик Ланчестер — английский эрудит и инженер — предложил простую модель борьбы двух противников (скажем, двух армий), которая носит его имя. Заметим, что такая же модель была предложена офицером царской армии М.О. Осиповым в 1915 г. (Осипов, 1915). Поэтому справедливо называть эту модель моделью Ланчестера-Осипова. Далее в изложении будем следовать работе (Арнольд, 1998). В данной модели состояние системы описывается точкой (x, y)

положительного квадранта плоскости. Координаты этой точки x и y — численности противостоящих армий. Уравнения модели имеют следующий вид:

$$\frac{dx}{dt} = -by, \quad \frac{dy}{dt} = -ax. \quad (8.5)$$

Здесь a и b — мощность оружия армии x и армии y , соответственно. Другими словами, каждый солдат армии x убивает за единицу времени a солдат армии y (и соответственно каждый солдат армии y убивает b солдат армии x). Таким образом, общая эффективность всех выстрелов армии x дается как ax , а для армии y — как by . В работе (Арнольд, 1998) предполагается, что непрерывная аппроксимация достаточно хороша, и скорость изменения численности войск пропорциональна эффективности выстрелов противной стороны. «Жесткая», по В.И. Арнольду, модель (8.6) допускает точное решение в виде:

$$ax^2 - by^2 = \text{const}. \quad (8.6)$$

Изменение численности армий x и y происходит вдоль гиперболы, заданной уравнением (8.6) (рис. 8.3). По какой именно гиперболе пойдет война, зависит от начальной точки. Гиперболы разделены прямой $\sqrt{ax} = \sqrt{by}$. Если начальная точка лежит выше этой прямой, то гипербола выходит на ось y . Это означает, что в ходе войны численность армии x уменьшается за конечное время до нуля. Армия y выигрывает, противник уничтожен. Если же начальная точка лежит ниже прямой, выигрывает армия x .

На прямой, как пишет Арнольд, война «к всеобщему удовлетворению» заканчивается истреблением обеих армий. Но на это требуется бесконечно большое время: конфликт продолжает тлеть, когда оба противника уже обессилены. Из соотношения (8.6) следует, что на прямой $\sqrt{ax} = -\sqrt{by}$. Тогда первое уравнение системы (8.6) принимает вид: $dx/dt = -\sqrt{ab}x$. Его решением является $x = Ce^{-\sqrt{abt}}$, где $C = \text{const}$, и очевидно, что $x \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

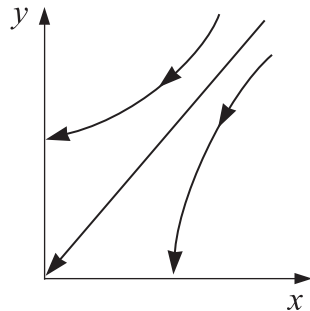


Рис. 8.3. «Жесткая» модель войны

Из модели (8.5) следует вывод, что для борьбы с вдвое более многочисленным противником необходимо иметь в четыре раза более мощное оружие, с втрое более многочисленным — в девять раз и т.д. На это указывают квадратные корни в уравнении прямой.

Ясно, что получившаяся, в терминологии Арнольда, «людоедская» модель сильно идеализирована, и её опасно применять к реальной ситуации. Что изменится, если

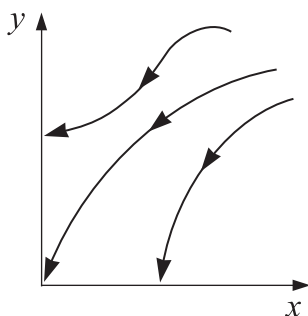


Рис. 8.4. «Мягкая» модель войны

$$\frac{dx}{dt} = -b(x, y)y, \quad \frac{dy}{dt} = -a(x, y)x?$$

Эта система уравнений уже не решается в явном виде. Но модель за счет изменений $a(x, y)$ и $b(x, y)$ становится «мягкой». Кривые на плоскости (x, y) уже — не гиперболы и разделяет их не прямая (рис. 8.4). Но основной качественный вывод остается прежним: ситуации « x выигрывает» и « y выигрывает» разделены нейтральной линией

«обе армии уничтожают друг друга за бесконечное время».

8.5. Простейшая вирусная модель инфекционного заболевания

В 1974 г. Г. Белл предложил простейшую модель иммунной реакции, в которой взаимодействие между антигеном и антителом описывается в терминах «хищник—жертва».

Изложим вариант теории Г. Белла (Bell, 1973) исходя из более общей модели Г.И. Марчука (Марчук, 1985).

Основными факторами в модели инфекционного заболевания являются следующие:

- концентрация патогенных размножающихся антигенов $V(t)$;
- концентрация антител $F(t)$, под антителами понимают субстраты иммунной системы, нейтрализующие антигены (иммуноглобулины, рецепторы клеток);
- концентрация плазмноклеток C — носителей и продуцентов антител — предполагается постоянной;
- степень поражения органа-мишени не учитывается.

Уравнение, описывающее изменение числа антигенов (чужеродных клеток, проникающих в организм), имеет вид

$$\frac{dV}{dt} = \beta V - \gamma FV. \quad (8.7)$$

Первое слагаемое в уравнении (8.7) — скорость прироста антигенов за счет размножения; β — коэффициент размножения антигенов; слагаемое γFV описывает число антигенов, нейтрализуемых антителами F в единицу времени; γ — коэффициент, связанный с вероятностью нейтрализации антигена антителами при встрече с ними.

Для получения второго уравнения подсчитаем баланс числа антител, реагирующих с антигеном. Будем иметь

$$dF = \rho C dt - \eta \gamma FV dt - \mu_f F dt. \quad (8.8)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (8.8) описывает генерацию антител плазмменными клетками за время dt ; ρ — скорость производства антител плазмоклеткой. Второе слагаемое ($\eta \gamma FV dt$) описывает уменьшение числа антител за счет связи с антигенами, причем на нейтрализацию одного антигена приходится η антител. Третье слагаемое ($\mu_f F dt$) описывает уменьшение популяции антител за счет старения; μ_f — коэффициент, обратно пропорциональный времени распада антител. Разделив уравнение (8.8) на dt , получим

$$\frac{dF}{dt} = \rho C - (\mu_f + \eta \gamma V) F. \quad (8.9)$$

Если при $t < t_0$, $V(t) \equiv 0$, то начальные условия имеют вид

$$V(t_0) = V_0, \quad F(t_0) = F_0. \quad (8.10)$$

Пусть в дальнейшем $t_0 = 0$.

Рассмотрим два предельных случая динамики болезни. Допустим, что организм не производит антител данной специфичности, т.е. $F(t) = F_0 = 0$ для всех $t \geq 0$ и $\rho = 0$. Тогда из (8.7) следует, что

$$\frac{dV}{dt} = \beta V \text{ и } V(t) = V_0 e^{\beta t}, \quad (8.11)$$

где V_0 — доза заражения (начальная концентрация антигенов) при $t = 0$. Очевидно, что такое решение соответствует течению болезни с летальным исходом, так как нет компенсирующих рост антигенов факторов. Второй предельный случай: присутствующие в организме антитела (специфические к данному антигену) до-

статочны для того, чтобы уничтожить все проникшие в организм антигены, не включая в действие механизм антителообразования. В этом случае в уравнении (8.7) $\beta = \gamma F$. Предполагая дозу заражения V_0 малой, можно считать величину F постоянной, определяемой нормальным уровнем антител F^* . Тогда уравнение (8.7) имеет вид

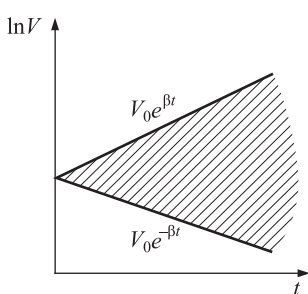


Рис. 8.5. Область заболеваний, ограниченная решениями для двух предельных случаев

$$\frac{dV}{dt} = (\beta - \gamma F^*) V$$

и его решение записывается так:

$$V = V_0 e^{-(\gamma F^* - \beta)t}.$$

В предельном случае, когда $B = 0$

$$V = V_0 e^{-\gamma F^* t}, \quad (8.12)$$

что соответствует высокому иммунологическому барьеру.

Решения (8.11) и (8.12) представлены на рис. 8.5. При заданных значениях коэффициентов модели и начальных условиях естественно, что все семейство разнообразных динамик заболевания уложится в заштрихованной области на рис. 8.5 (Марчук, 1985).

8.6. Сходные модели распространения эпидемий

Рассмотрим SIR-модель Кермака-МакКендрика, полагая, что особи популяции могут быть в трех различных состояниях:

- $S(t)$ — здоровые особи, которые находятся в группе риска и могут подхватить инфекцию;
- $I(t)$ — заразившиеся переносчики болезни;
- $R(t)$ — те, кто выздоровел и перестал распространять болезнь (в эту категорию относят, например, приобретших иммунитет или даже умерших).

Типичная эволюция особи популяции описывается следующей диаграммой: $S \rightarrow I \rightarrow R$.

Построим феноменологическую модель, соответствующую диаграмме, используя следующие допущения:

- 1) популяция замкнута и имеет постоянный размер N ;

2) промежуток времени, когда заболевший остается опасным для окружающих, распределен по экспоненциальному закону со средним $1/\gamma$;

3) контакты случайны и равновозможны (однородное перемешивание).

При этих допущениях будем иметь:

$$\frac{dS}{dt} = -\lambda S, \quad \frac{dI}{dt} = \lambda I - \gamma I, \quad \frac{dR}{dt} = \gamma I,$$

где λ — так называемая сила инфекции, которая в данном случае равна произведению количества контактов в единицу времени, сделанных одним здоровым (обозначим это количество как cN), вероятности передать ему инфекцию при контакте p и вероятности встретить заболевшего $I(t)/N$. Обозначив $\beta = cp$, получаем $\lambda = \beta I$ и приходим к стандартной форме уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta SI, & \frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I, & \frac{dR}{dt} = \gamma I, & \frac{dS}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = 0, \\ S(t) + I(t) + R(t) = N. \end{cases} \quad (8.13)$$

Третье уравнение в приведенной системе избыточно, и поскольку $dS/dt \leq 0$, то естественно считать фазовым пространством треугольник $S(t) + I(t) \leq N$.

Из первого и второго уравнений системы (8.13) следует, что

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dS} &= \frac{(\beta S - \gamma)I}{\beta SI} = -1 + \frac{\sigma}{S}, \\ \sigma &= \frac{\gamma}{\beta}, \quad I \neq 0. \end{aligned} \quad (8.14)$$

Учитывая начальные условия $S(0) = S_0$, $I(0) = I_0$, найдем первый интеграл

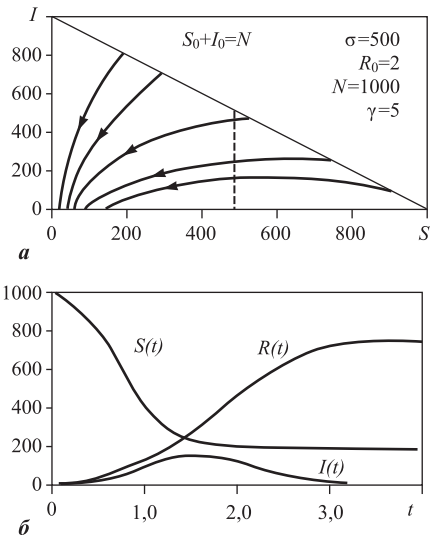


Рис. 8.6. Пример конкретного расчета по уравнениям (8.13) и (8.14)

$I + S - \sigma \ln S = I_0 + S_0 - \sigma \ln S_0$, с помощью которого можно построить фазовые кривые на плоскости (S, I) (рис. 8.6). Кривые, приведенные на рис. 8.6, б, хорошо совпадают с данными по эпидемии чумы в Бомбее 1906 г.

В книге (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) предложено использовать модель, рассмотренную выше, с некоторой модификацией для анализа заражения вирусом компьютеров. Постановка задачи следующая.

Пусть S — число компьютеров, которые подвергаются заражению вирусом, I — часть компьютеров, зараженных вирусом и не имеющих антивирусного программного обеспечения, R — часть компьютеров, имеющих должную антивирусную защиту (иммунитет). Тогда уравнения модели имеют вид (см. систему уравнений (8.13)):

$$\frac{dS}{dt} = -aSI, \quad \frac{dI}{dt} = aSI - bI, \quad \frac{dR}{dt} = bI.$$

Основная идея модификации этой классической модели эпидемии состоит во введении элемента цикличности, т.е. элемента, регулирующего добавления новых подверженных эпидемии компьютеров. В каждый новый отрезок времени число инфицированных компьютеров вычисляется на основе количества инфицированных компьютеров, оставшихся от предыдущего момента, а число подверженных эпидемии компьютеров разыгрывается как случайная величина по закону Пуассона с распределением $\rho_m = (\lambda^m/m!)e^{-\lambda}$, $m = 1, 2, \dots$ Решение задачи в (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) не приводится. Авторы (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) предлагают следующий путь решения: построить график функции $I(t)$, численно решая приведенную выше систему уравнений с начальными условиями $S(0) = 100$, $I(0) = 1$, $R(0) = 0$, $\lambda = 10$, $a = 0,23$, $b = 0,5$. Добавление новых элементов предлагается производить при $t_k = k$, $k = 1, 2, \dots 100$.

Предлагается читателю самому попробовать решить (а вариантов решения много) эту актуальную задачу для пользователей компьютера.

8.7. Обобщенная модель Лотки-Вольтерры для описания взаимодействия когнитивных и/или эмоциональных мод мозга

Согласно работе (Рабинович, 2010), крупномасштабные когнитивные паттерны (моды или представления, наблюдаемые в эксперименте) в рабочем режиме мозга должны подавлять друг друга, что, естественно, должно происходить последовательно во времени. Иными словами, работающий мозг демонстрирует когнитивную и эмоциональную активность в виде цепочки сменяющих друг друга во времени комбинаций функциональных мод, а сами эти комбинации определяются родом ментальной активности.

По мнению авторов упомянутой работы, «конкуренция за конечные ресурсы — одна из главных действующих сил, управляющих процессами мозга. Эти ресурсы — энергия (кислород и глюкоза) и информация (внимание и память). Важно, что информационные ресурсы — продукт деятельности самого мозга, то есть они могут по-разному влиять на эмоции и когнитивные функции (например, за счет управления вниманием) и должны быть включены в общую динамическую модель, определяющую рабочее пространство. ...Моды, представляющие в рабочем пространстве эмоции и когнитивные функции, взаимно обмениваются информацией и конкурируют в борьбе за энергетические и информационные ресурсы».

М.И. Рабинович с коллегами претендуют на новую парадигму, заключающуюся в утверждении: «эмоции и когнитивные функции — это переходные динамические процессы, связанные с функционально определяемым взаимодействием различных подсистем мозга, их конкуренцией и синхронизацией (координацией) во времени». Упомянутые выше процессы конкуренции когнитивных и эмоциональных мод между собой, а также эмоциональных и когнитивных мод друг с другом в работе (Рабинович, 2010) предлагается описывать системами уравнений типа Лотки-Вольтерры в следующей обобщенной форме:

$$\tau \frac{dx_i(t)}{dt} = x_i(t) \left[\mu_i(E) - \sum_{j=1}^n \phi_{i,j}(E) x_j(t) \right] + x_i(t) \eta(t), \quad i=1, \dots, n. \quad (8.15)$$

Здесь $x_i(t)$ характеризует активность i -й моды (численность i -й популяции в экологии); n — число взаимодействующих мод

(популяций); $\mu_i(E)$ — поступающая в систему информация или доступные ресурсы; $\varphi_{i,j}(E)$ — элементы матрицы взаимодействия; $\eta(t)$ — мультипликативный шум, присутствующий в системе; τ — характерное время, определяющее процесс.

Если учесть специфику ресурсов, за которые борются когнитивные и эмоциональные моды, подсистем уравнений (8.15) должно быть три: моды эмоций, когнитивные моды и ресурсы (внимание, память, энергия). Особенно велика роль внимания. В статье (Рабинович, 2010) для простоты считается, что описание конкуренции за внимание между эмоциями и когнитивными функциями не требует спецификации отдельных мод, и поэтому можно ограничиться рассмотрением конкурентной борьбы за внимание «в целом» эмоций $\tilde{B} = \sum_{i=1}^n B_i$ и «в целом» когнитивных мод $\tilde{A} = \sum_{i=1}^n A_i$. Тогда базовые уравнения можно записать в виде:

$$\begin{aligned}\tau_A \frac{dA_i(t)}{dt} &= A_i(t) \left[\sigma_i(I, \tilde{B}, D) R_A - \sum_{j=1}^M \rho_{ij}(D) A_j(t) \right] + A_i(t) \eta(t), \quad i = 1, \dots, N, \\ \tau_B \frac{dB_i(t)}{dt} &= B_i(t) \left[\zeta_i(S, \tilde{A}, D) R_B - \sum_{j=1}^M \xi_{ij}(D) B_j(t) \right] + B_i(t) \eta(t), \quad i = 1, \dots, M, \\ \tau_{R_A} \frac{dR_A(t)}{dt} &= R_A(t) \left[\tilde{A} - (R_A(t) + \Phi_A(I, D) R_B(t)) \right], \\ \tau_{R_B} \frac{dR_B(t)}{dt} &= R_B(t) \left[\tilde{B} - (R_B(t) + \Phi_B(S, D) R_A(t)) \right].\end{aligned}\tag{8.16}$$

В этих уравнениях A_i и B_i — неотрицательные переменные, соответствующие когнитивным и эмоциональным модам, общая интенсивность которых обозначается $\tilde{A}$ и $\tilde{B}$ соответственно; I — информация от внешнего мира; S — характеристика эмоционального влияния от внешнего мира (в случае отрицательных эмоций — стресс); D — уровень принимаемых лекарств; τ_A и τ_B — характерные времена сознательной и эмоциональной активностей; $\eta(t)$ — мультипликативный шум; коэффициенты Φ_A и Φ_B определяют интенсивность борьбы за внимание со стороны эмоций и мышления. Зависимость параметров σ_i и ζ_i от $\tilde{A}$ и $\tilde{B}$ описывает прямое влияние активности когнитивных процессов на эмоции и эмоций на мышление. В статье (Рабинович, 2010) представлен

компьютерный анализ выписанных выше уравнений при наличии внешнего стимула $S(t)$, характеризующего уровень стресса. Обсуждается также взаимодействие настроения и мышления. Анализируется взаимодействие трех компонент активности мозга: поведения, эмоциональной памяти и когнитивной деятельности при отсутствии внешних воздействий.

Литература к главе 8

- Арнольд В.И. «Жесткие» и «мягкие» модели // Природа. 1998. № 4.
- Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. М.; Ижевск, 2003.
- Братусь А.С., Мещерин А.С., Новожилов А.С. Математические модели взаимодействия загрязнения с окружающей средой // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Вычислительная математика и кибернетика. 2001. № 1.
- Братусь А.С., Новожилов А.С., Платонов А.П. Динамические системы и модели биологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
- Браун Дж. Чарльз Дарвин. Происхождение видов / Сер. «10 книг, изменивших мир». М.: АСТ: Астрель, 2009.
- Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование / Пер. с франц. М.: Наука, 1976.
- Занг В.-Б. Синергетическая экономика. Время и перемены в нелинейной экономической теории / Пер. с англ. М.: Мир, 1999.
- Малков С.Ю. Социальная самоорганизация и исторический процесс. Глава 2. М.: УРСС, 2009.
- Марчук Г.И. Математические модели в иммунологии и медицине. М.: Наука, 1985.
- Неймарк Ю.И. Математические модели в естествознании и технике. Н. Новгород, 2004.
- Осинов М.О. О влиянии численности вступающих в бой сил на их потери // Военный сборник. 1915. Июнь-Октябрь.
- Рабинович М.И., Мюезинолу М.К. Нелинейная динамика мозга: эмоции и интеллектуальная деятельность // УФН. 2010. № 180.
- Bell G. Prey — predator equations simulating on immune response // Math. Biosci. 1973. N 16. P. 291.
- Darwin Ch. The Autobiography of Charles Darwin 1809–1882. Nora Barlow. London, 1958.
- Lanchester F.W. Aircraft in warfare: The down of the fourth arm. London, 1916.
- Lotka A. Elements of Physical Biology. Baltimore. Reprinted by Dover in 1956 as Elements of Mathematical Biology, 1925.
- Goodwin R.M. A Growth Model. Socialism and Growth. Cambridge: University Press, 1967.
- Kermack W.O., McKendrick A.G. Contribution to the mathematical theory of epidemics // Proceedings of Royal Statistical Society A. 1927. N 115.

Усложненные модели «хищник—жертва»

Система «хищник—жертва» с учетом внутривидовой конкуренции:

$$\frac{dN}{dt} = aN \left(1 - \frac{N}{K_1} \right) - bNP, \quad \frac{dP}{dt} = -dP \left(1 - \frac{P}{K_2} \right) + cNP,$$

где $K_{1,2}$ — потенциальные емкости экологических систем, которые определяются доступным количеством ресурсов и соответствуют предельным значениям численности популяций. В безразмерных переменных данная система уравнений примет вид

$$\frac{du}{dt} = u(1 - \alpha u - v), \quad \frac{dv}{dt} = v(-\gamma - \beta v + u), \quad (\text{п. 1})$$

где $N(t) = (a/c)u(\tau)$, $P(t) = av(\tau)/b$, $\tau = at$, $\gamma = d/a$, $\alpha = a/(cK_1)$, $\beta = d/(aK_2)$.

Модель конкуренции

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1} \right) - e N_1 N_2; \quad \frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \left(1 - \frac{N_2}{K_2} \right) - h N_1 N_2. \quad (\text{п. 2})$$

Здесь r_1, r_2, e, h — положительные постоянные.

Анализ системы уравнений (п. 2) показывает: если n популяций линейно зависят от m ресурсов, причем $m < n$, то по крайней мере одна из популяций вымирает.

Модель мутуализма (симбиоза)

$$\frac{du_1}{dt} = u_1(r_1 + a_{11}u_1 + a_{12}u_2), \quad \frac{du_2}{dt} = u_2(r_2 + a_{21}u_1 + a_{22}u_2). \quad (\text{п. 3})$$

Для описания мутуализма достаточно потребовать, чтобы

$$a_{12} > 0, \quad a_{21} > 0.$$

Детальный анализ приведенных моделей можно найти, например, в книгах (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) и (Базыкин, 2003).

Следуя (Базыкин, 2003) в изложении (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010), рассмотрим *обобщенную модель* Лотки-Вольтерры, описываемую системой уравнений

$$\frac{du}{dt} A(u) - B(u, v), \quad \frac{dv}{dt} = -D(v) + C(u, v), \quad (\text{п. 4})$$

где u и v — численности жертв и хищников соответственно, $A(u)$ — функция размножения жертв при отсутствии хищников; $D(v)$ — функция вымирания хищников при отсутствии жертв; функция $B(u, v)$ описывает выедание хищниками жертв; $C(u, v)$ — эффективность потребления жертв хищниками. Перечислим возможные дополнительные факторы внутри- и межпопуляционных отношений (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010).

- Нелинейная зависимость скорости размножения популяций жертв от плотности при малых значениях плотности (отсутствие достаточного количества брачных пар): $A(u) = au^2/(N + u)$, где a и N — положительные постоянные.
- Внутривидовая конкуренция жертв: $A(u) = au(1 - u/K)$.
- Насыщение хищников: $B_1(u) = bu/(1 + \alpha u)$ — трофическая функция хищника.
- Нелинейный характер выедания хищниками жертв: $B_1(u) = bu^2/(1 + \alpha u)$.
- Конкуренция хищников за жертв: $B_2(v) = bv/(1 + \beta v)$. При этом $B(u, v) = B_1(u)B_2(v)$.
- Конкуренция хищников за отличные от жертв ресурсы: $C(v) = v/(1 + v/K_1)$.
- Нелинейный характер зависимости скорости размножения хищника от плотности популяции при малых значениях плотности: $C_2(v) = cv/(N_v + v)$, при этом $C(u, v) = C_1(u)C_2(v)$ и $C_1(u) = B_1(u)$, $D_2(v) = cv$, т.е. $C(u, v) = cv/(N_v + v)B_1(u)$.

Математическая модель взаимодействия загрязнения с окружающей средой, трактуемая как модель «хищник—жертва»

Предположим, что общий фон загрязнения и состояние окружающей среды можно характеризовать следующими перемен-

ными: концентрацией загрязнения P и плотностью биомассы E соответственно. В том случае, если существует постоянно действующий источник загрязнения, процесс эволюции загрязнения можно описать уравнением

$$\frac{dP}{dt} = a - bP, \quad (\text{п. 5})$$

где a — мощность источника загрязнения за единицу времени, b — коэффициент естественного уничтожения загрязнения (такое уничтожение называют «мертвым», или естественной диссипацией). При начальном условии $P(t = 0) = P_0$ решение уравнения (п. 5) имеет вид:

$$P(t) = \frac{a}{b} + \left(P_0 - \frac{a}{b} \right) e^{-bt},$$

т.е. со временем концентрация загрязнения уменьшается естественным образом.

Предположим далее, что загрязнение находится в постоянном взаимодействии с окружающей средой, которая оказывает очищающий эффект на загрязнение. Будем также считать систему «окружающая среда — загрязнение» замкнутой. Тогда процесс взаимодействия с окружающей средой можно описать следующей системой уравнений:

$$\frac{dP}{dt} = a - bP - f(E, P), \quad \frac{dE}{dt} = g(E) - h(E, P), \quad (\text{п. 6})$$

где функция $f(E, P) \geq 0$ описывает поглощение и переработку загрязнения окружающей средой; $g(E)$ — слагаемое, описывающее динамику окружающей среды в отсутствие загрязнения; $h(E, P)$ — функция, описывающая вредное влияние загрязнения на окружающую среду.

Примем в качестве функций взаимодействия загрязнения и живой природы

$$f(E, P) = cEP \text{ и } h(E, P) = dEP,$$

где c и d — постоянные коэффициенты.

Будем считать, что при отсутствии загрязнения поведение окружающей среды можно описать логистическим уравнением (см. гл. 7), т.е. $g(E) = rE(1 - E/K)$, где r — постоянный коэффици-

ент, а K — соответствует максимальному значению E при $dE/dt = 0$. Подставив выражения для $f(E, P)$, $h(E, P)$ и $g(E)$ в систему уравнений (8.9), получим

$$\frac{dP}{dt} = a - bP - cEP, \quad \frac{dE}{dt} = rE \left(1 - \frac{E}{K} \right) - dEP. \quad (\text{п. 7})$$

Переходя в системе уравнений (8.10) к безразмерным переменным

$$P = \frac{bu}{d}, \quad E = \frac{bv}{c}, \quad \tau = bt, \quad \alpha = \frac{ad}{b^2}, \quad u_0 = \frac{r}{b}, \quad p = \frac{r}{cK},$$

получаем простейшую математическую модель взаимодействия загрязнения с окружающей средой в виде следующих уравнений:

$$\frac{du}{dt} = \alpha - u - uv, \quad \frac{dv}{dt} = v(u_0 - u) - pv^2. \quad (\text{п. 8})$$

Легко видеть, что система уравнений (8.10) есть система «хищник-жертва», где в качестве жертвы выступает загрязнение (не биологический объект), а в качестве хищника — биологически активная окружающая среда.

В системе уравнений (п. 8) параметр α можно трактовать как обобщенную мощность источника загрязнения; u_0 — предельно допустимая концентрация для данной экосистемы (если $u > u_0$, $dv/dt < 0$, и природа вымирает); p — характеристика экосистемы — коэффициент внутривидовой конкуренции природы.

Положения равновесия системы уравнений (п. 8), соответствующие условиям $du/dt = 0$ и $dv/dt = 0$, нетрудно найти из уравнений

$$\alpha - u(1 + v) = 0, \quad -v(u - u_0) - pv^2 = 0.$$

Тогда $A_1 = (\alpha, 0)$; $A_2((u_0 + p + Q)/2, (u_0 - p - Q)/(2p))$;

$$A_3((u_0 + p - Q)/2, (u_0 - p + Q)/(2p)), \quad Q = \sqrt{(u_0 + p)^2 - 4\alpha p}.$$

Второе и третье положения равновесия существуют, если $[(u + p)^2 - 4\alpha p] > 0$. Стандартный линейный анализ на устойчивость указанных положений равновесия приводит к параметрическому портрету системы уравнений (п. 8), приведенному на

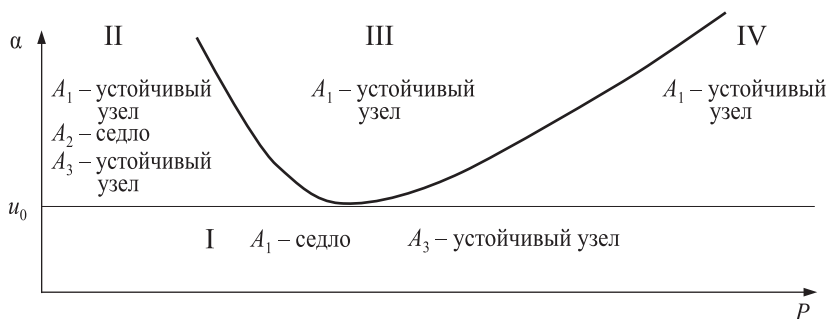


Рис. п. 1. Параметрический портрет системы уравнений (п. 8). При фиксированном u_0 вся область допустимых параметров разбивается на четыре множества

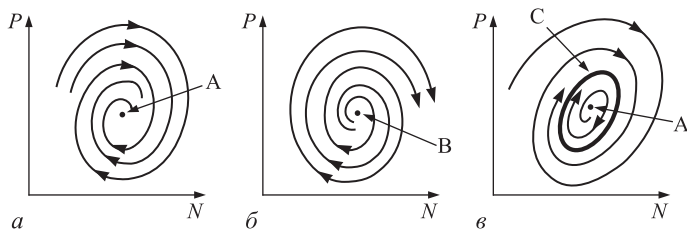


Рис. п. 2. Фазовые портреты системы уравнений (п. 8)

рис. п. 1. На рис. п. 2 приведены соответствующие фазовые портреты системы уравнений (п. 8).

Если параметры принадлежат области IV, то все траектории за исключением устойчивого многообразия A_1 стремятся при $t \rightarrow \infty$ к A_3 (рис. п. 2, а). Области II соответствует фазовый портрет на рис. п. 2, б. В области III существует единственный глобальный аттрактор A_1 (рис. п. 2, в).

Таким образом, описанная математическая модель соответствует трем качественно описанным выше ситуациям.

Однако в начале этого раздела в качестве главного предположения было указано, что модель содержит пороговую величину загрязнения, которое способна переработать природа. Этот эффект нужно учесть в математической модели.

Для этого в книге (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) предлагается использовать одну из трофических функций, описывающих процесс насыщения, например,

$$f(E, P) = \frac{cEPb/d}{A + P}. \quad (\text{п. 9})$$

Тогда при малой концентрации загрязнения $f(E, P) \approx cPE$, при высокой концентрации $f(E, P) \approx cE$, что более реалистично, чем первоначальное выражение.

После приведения системы уравнений (п. 6) к безразмерному виду с учетом соотношения (п. 9) и переобозначений в (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) получена следующая система уравнений:

$$\frac{du}{dt} = \alpha - u - \frac{uv}{\lambda + u}, \quad \frac{dv}{dt} = v(u_0 - u) - pv^2, \quad (\text{п. 10})$$

где $\lambda = A(d/b) > 0$ описывает степень влияния природы на загрязнение: чем больше его величина, тем меньше степень поглощения живой природы и наоборот.

По мнению авторов книги (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010), параметр λ можно считать количественной характеристикой восприимчивости данной экосистемы к выбросам загрязнения.

В книге (Братусь, Новожилов, Платонов, 201) также указано, что в системе уравнений (п. 10) возможны одно, два или три состояния равновесия такого же характера, как и для системы (п. 8). Причем авторы (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) подчеркивают, что априорные предположения относительно выбора тех или иных функциональных зависимостей в этой модели в большей степени адекватны действительности, чем выбранные модели (п. 8).

Математическая модель очистки сточных вод

Рассмотрим далее модель очистки сточных вод, основанную на следующих простых представлениях.

Предположим, что имеется постоянный источник загрязнения, а активный ил способен перерабатывать загрязнение до определенного предела. Считаем, что изменение концентрации активного ила в чистой воде убывает по экспоненциальному закону.

Тогда динамику очистки сточных вод можно описать уравнениями

$$\frac{dP}{dt} = a - bD(P) - cf(P, E), \quad \frac{dE}{dt} = -dE + eh(P, E),$$

где $P(t)$ — концентрация загрязнения воды, $E(t)$ — плотность биомассы активного ила, $D(P)$ — функция диссипации, характеризу-

ющая естественный распад загрязнения; $f(P, E)$ и $h(P, E)$ — трофические функции, характеризующие процесс очистки загрязнителя биологически чистым илом; $a > 0$ — мощность источника загрязнения; $d > 0$ — постоянная, характеризующая скорость убывания активного ила в чистой воде; c и e — положительные постоянные.

Допустим, что $D(P) = P$, а трофические функции «хищника» и «жертвы» одинаковы и имеют вид:

$$f(P, E) = h(P, E) = \frac{PE}{r + P},$$

где $r > 0$ — постоянная. Тогда будем иметь:

$$\frac{dP}{dt} = a - bP - \frac{cPE}{r + P}, \quad \frac{dE}{dt} = -dE + \frac{ePE}{r + P}. \quad (\text{п. 11})$$

После введения безразмерных переменных $\tau = \alpha t$, $P = ru(\tau)$, $E = (rd/c) \cdot v(\tau)$ система уравнений (п. 11) принимает вид

$$\frac{du}{d\tau} = \alpha - \beta u - \frac{uv}{1 + u}, \quad \frac{dv}{d\tau} = -v + \frac{\gamma uv}{1 + u}, \quad (\text{п. 12})$$

где $\alpha = a/(rd)$, $\beta = b/d$, $\gamma = e/d$. Неподвижные точки системы (п. 12) $A_1(u_1, v_1) = (\alpha/\beta, 0)$ и $A_2(u_2, v_2) = (1/(\gamma - 1), [\alpha(\gamma - 1) - \beta]\gamma/(\gamma - 1))$.

Стандартный линейный анализ показывает, что точка $A_1(u_1, v_1)$ является седловой при $\beta < \alpha(\gamma - 1)$ и $\gamma > 0$ и устойчивым узлом при $\beta > \alpha(\gamma - 1)$.

Если увеличивать значение параметра α при фиксированных значениях β и $(\gamma - 1)$, что соответствует увеличению интенсивности источника загрязнения, то возникает устойчивое состояние равновесия $A_2(u_2, v_2)$. Если параметр α мал (мала интенсивность загрязнения), то масса биологически активного ила стремится к нулю. Поскольку загрязнитель является пищей для биологически активного ила, при недостаточной интенсивности загрязнителя биологически активный ил исчезает.

Разумно предположить, что существует некоторое пороговое значение концентрации загрязнения P^* , при превышении которого очищающая способность ила уменьшается, и рассмотреть трофические функции вида

$$f(P, E) = EPe^{-rP}, \quad r = \text{const} > 0.$$

В этом случае величина порогового значения загрязнения $P^* = 1/r$. В реальности в описываемом процессе есть еще одна компонента — процесс аэрации — насыщения ила кислородом, который значительно повышает способность переработки биологически активным илом загрязнителя. С учетом сказанного математическая модель очистки примет вид:

$$\frac{dP}{dt} = a - bP - cf(P, E), \quad \frac{dE}{dt} = -dE + ef(P, E)Q(t), \quad \frac{dQ}{dt} = -hQ + R, \quad (\text{п. 13})$$

где $a, b, c, d, e = \text{const} > 0$. Здесь $Q(t)$ — концентрация кислорода, а $R > 0$ определяет величину притока кислорода в систему в единицу времени.

Проведенный авторами книги (Братусь, Новожилов, Платонов, 2010) анализ системы уравнений (п. 13) в предположении, что $f(P, E) = Pg(E)$, где $g(E)$ — гладкая монотонно возрастающая неотрицательная функция (причем $g(0) = 0$), показывает, что при достаточно близких значениях параметра R , определяющего количество поступающего в систему кислорода, всегда можно добиться стабильности системы.

Литература к Приложению 1 к главе 8

Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. М.; Ижевск, 2003.

Братусь А.С., Новожилов А.С., Платонов А.П. Динамические системы и модели биологии. М.: Физматлит, 2010.

Рабочие тратят весь свой доход wL на потребление, капиталисты накапливают свой доход $Y - wL$, где Y — продукция производства. Цена потребительских товаров нормирована к единице.

Пусть K означает капитал, $a = a_0 e^{gt} = Y/L$ — производительность труда, возрастающую с постоянной скоростью g , $k = K/Y$ — коэффициент капиталоемкости продукции, $N = N_0 e^{nt}$ — предложение на рынке рабочей силы, которое увеличивается с темпом роста n . Доля затрат на оплату труда по отношению к национальному доходу составляет $wL/Y = w/a$. Следовательно, доля прибыли капиталистов составляет $(1 - w/a)$. Поскольку сбережения можно определить как $S = Y - wL = (1 - w/a)Y$, доля инвестиций составляет $dK/dt = S = (1 - w/a)Y$ или $(dK/dt)(1/K) = (1 - w/a)(Y/K)$; при этом выбытием капитала пренебрегаем.

При постоянном значении капиталоемкости $k = K/Y$ получаем $dk/dt = 0$ и

$$Y \frac{dK}{dt} = K \frac{dY}{dt}. \quad (\text{п. 1})$$

Далее, поскольку $a = a_0 e^{gt} = Y/L$, после дифференцирования по времени имеем

$$\frac{dY}{dt} \frac{1}{Y} - \frac{dL}{dt} \frac{1}{L} = g. \quad (\text{п. 2})$$

Кроме того, из (п.1) с учетом того, что $dK/dt = (1 - w/a)L$, следует

$$\frac{dY}{dt} \frac{1}{Y} = \frac{dK}{dt} \frac{1}{K} = \left(1 - \frac{w}{a}\right) \frac{1}{k}. \quad (\text{п. 3})$$

Из соотношений (п. 2) и (п. 3) окончательно находим:

$$\frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \left(1 - \frac{w}{a}\right) \frac{1}{k} - g. \quad (\text{п. 4})$$

Введем новые переменные: $y = w/a$ — доля затрат на оплату труда; $x = L/N$ — коэффициент занятости.

После простых преобразований с учетом (п.4) получаем

$$\frac{dx}{dt} = x \left[\frac{1-y}{k} - (g+n) \right], \quad (\text{п. 5})$$

$$\frac{dy}{dt} = y \left[\frac{1}{w} \frac{dw}{dt} - \frac{1}{a} \frac{da}{dt} \right], \quad (\text{п. 6})$$

где $(da/dt)(1/a) = g$.

Будем считать ставку заработной платы быстрой переменной, удовлетворяющей условиям:

$$\frac{dw}{dt} = wf(x), \quad \lim_{x \rightarrow 1} f(x) = \infty, \quad \lim_{x \rightarrow 0} f(x) < 0, \quad \frac{df}{dx} > 0.$$

Линейная аппроксимация $f(x)$ в виде $(dw/dt)(1/w) = -r + bx$ превращает (п. 6) в следующее уравнение:

$$\frac{dy}{dt} \frac{1}{y} = -r + px - g. \quad (\text{п. 7})$$

Объединяя (п. 5) и (п. 6), приходим к модели Гудвина, описываемой системой уравнений

$$\frac{dx}{dt} = x \left[\frac{1}{k} - (g+n) - \frac{y}{k} \right], \quad \frac{dy}{dt} = y [-(g+r) + px]. \quad (\text{п. 8})$$

Очевидно, что система уравнений (п. 8) эквивалентна системе уравнений (8.4), поэтому все выводы общего характера, справедливые для системы (8.4), верны и для модели Гудвина.

Литература к Приложению 2 к главе 8

Goodwin R.M. A Growth Model // Socialism and Growth. Cambridge: University Press, 1967.

Глава 9

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С РОСТОМ НАРОДОНАСЕЛЕНИЯ ЗЕМЛИ

Проблема роста населения Земли представляется одной из самых важной глобальных проблем, стоящих перед человечеством. Тесно с ней связаны и другие проблемы, которые все острее стоят в современном мире и с которыми в том или ином виде сталкиваются все страны, а именно проблемы миграции и проблемы сельского хозяйства. Все большая глобализация современной экономики, открытость границ, высокая мобильность индивидов и в то же время усиливающаяся социальная напряженность при взаимодействии различных культур (особенно ярко это видно на примере Западной Европы, где мигранты из Африки, Ближнего Востока, Индии и т.д. начинают оказывать сильное влияние на традиционный уклад жизни и систему европейских ценностей) требуют анализа и понимания миграционного движения как явления, имеющего многообразный характер, определяемый совокупностью экономических, демографических, социальных, психологических и других процессов. Следует также отметить, что сельское хозяйство, которое на протяжении столетий оставалось достаточно консервативным и стабильным, в последнее столетие развивалось в условиях интенсификации в связи с ростом народонаселения. Это произошло благодаря появлению новых технологий, дающих такие возможности. Всего за несколько десятилетий в сельском хозяйстве произошли кардинальные изменения, а их глобализация, появление глобального рынка сельскохозяйственной продукции приводит к тому, что катастрофичность изменений возможна не только в локальных масштабах.

Анализ глобальных проблем роста народонаселения и связанных с ним вопросов несомненно является сложной задачей, если не найти пути к ее решению на основе общих свойств демографических систем, которые могут привести к уменьшению числа переменных и упрощению рассмотрения. Собственно рост народонаселения и миграцию обычно рассматривают статистическими и демографическими методами, разработанными для описания населения отдельных стран или регионов (Борисов, 2004;

Коротаев и др., 2007). Эти статистические сведения дают ключ к пониманию количественных законов, в принципе пригодных для описания глобальной динамики роста народонаселения как всего мира, так и отдельных регионов и стран.

В данной главе будут изложены вопросы применения междисциплинарных методов и подходов нелинейной динамики для качественного и количественного анализа глобальных процессов, связанных с ростом народонаселения Земли, применительно к демографическим, миграционным аспектам, а также проблемам сельского хозяйства. В главе будут рассмотрены некоторые методы и подходы к построению соответствующих качественных и количественных математических моделей роста численности популяций и народонаселения отдельных стран (Смит, 1976; Уильямсон, 1975; Короновский и др. 2003), миграции населения и проблем сельского хозяйства.

Наконец, мы остановимся на модели, предложенной С.П. Капицей (Капица, 1996; Капица, 1999; Капица, 2010), рассматривающей население мира как глобальную систему, представляющую собой единый и замкнутый объект, который достаточно характеризовать числом людей, существующих на Земле в данный момент. Подобный подход долгое время отрицался в демографии. Фактически несмотря на то, что народонаселение мира представляет собой сложную распределенную систему, каждый регион которой имеет свои уникальные особенности, описываемая модель позволяет оперировать только с численностью населения всего земного шара, являясь удачным примером эффективного моделирования глобальных процессов простыми математическими моделями. В рамках предложенной С.П. Капицей модели (Капица, 1996; Капица, 1999) население Земли рассматривается как единая система, поскольку все ее регионы, все части взаимодействуют между собой. Именно взаимосвязанность и взаимозависимость современного мира, обусловленная транспортными и торговыми связями, миграционными и информационными потоками, объединяют всех в целое и дают неоспоримые возможности рассматривать сегодня мир как систему. И в далеком прошлом, когда людей было мало и мир в значительной степени был разделен, все равно его популяции медленно, но верно взаимодействовали. Достаточно вспомнить хорошо известные из истории Крестовые походы, торговый Шелковый путь, колонизацию Африки и Америки. Процесс миграции есть лишь один из механизмов внутрисистемных взаимодействий. Вследствие миграции и войн происходит

перемешивание населения мира, позволяющее рассматривать его как единую систему. Однако при прекращении обмена и долговременной изоляции какой-либо популяции она перестанет быть частью большой системы.

Наконец, существенно и то, что биологически все люди принадлежат одному виду *Homo Sapiens*, у них одинаковое число хромосом — 46, отличное от всех других приматов, а все расы способны к смешению и социальному обмену. Более того, человечество представляет сравнительно однородный вид. Но по своей численности мы превышаем сравнимых с нами животных на пять порядков. Только домашние животные, живущие около человека, не ограничены в своей численности, как их дикие родственники, каждые из которых занимают свой ограниченный ареал, свою экологическую нишу. Человечество проживает практически на всех удобных для обитания частях Земли, и в своей деятельности человек создал свою окружающую среду. Есть основания утверждать, что на протяжении последнего миллиона лет человек биологически мало изменился, и все основное развитие и самоорганизация человечества происходили в социальной сфере (Cambridge Encyclopedia, 2004).

Именно эти процессы социального, технологического и экономического развития количественно описываются феноменологической математической моделью, интерпретируя данные демографии на основе системного подхода и синергетики (Николис и др., 1984; Хакен, 1985; Капица и др., 2003), что, по мнению С.П. Капицы, поможет ввести в антропологию, в частности, и в науки о человеке и обществе в целом новые методы для описания глобальных процессов.

9.1. Диффузионная модель роста численности населения, учитывающая «распределенность» ареалов проживания

Попробуем понять на простом модельном примере, как нужно модифицировать подробно рассмотренное в главе 7 уравнение Ферхюльста (7.7), чтобы учесть существенные факторы, «выпадающие из поля зрения» логистического уравнения. Рассмотрим гипотетическую популяцию организмов (например, бактерий), рост численности которой точно описывается логистической кривой (как уже отмечалось выше, обычная популяция бактерий

действительно хорошо описывается уравнением Ферхюльста). Теперь предположим такой эксперимент: возьмем две совершенно одинаковых чашки Петри, в каждую из которых поместим абсолютно одинаковое число бактерий (поскольку эксперимент наш мысленный, то можно позволить себе оперировать словами «совершенно» и «абсолютно одинаковые»). Рост суммарной численности обеих популяций будет описываться уравнением Ферхюльста, как если бы у нас была одна чашка Петри с вдвое большей емкостью среды (здесь предполагается, что бактерии движутся достаточно быстро по сравнению с временем деления бактерий, так что пространственным распределением бактерий можно пренебречь).

А теперь поместим в одну чашку Петри то же самое количество бактерий, что и в первой части опыта, а вторую чашку временно оставим пустой и поместим в нее бактерии (опять-таки то же самое количество) лишь по истечении некоторого времени. В каждой из чашек Петри динамика численности бактерий вновь будет описываться уравнением Ферхюльста, но рост суммарной численности обеих популяций подчиняться логистическому уравнению уже не будет. Это связано с нелинейностью логистического уравнения. Докажем это, проделав элементарные выкладки.

Действительно, пусть N_1 , K_1 — численность популяции бактерий и емкость среды в первой чашке Петри, N_2 , K_2 — во второй, а параметр k одинаков для обеих популяций и равен μ . Тогда динамика численности первой и второй популяций описывается соответственно уравнениями

$$\frac{dN_1}{dt} = \mu \frac{N_1(K_1 - N_1)}{K_1}, \quad \frac{dN_2}{dt} = \mu \frac{N_2(K_2 - N_2)}{K_2}. \quad (9.1)$$

Изменение суммарной численности популяции $N_1 + N_2$ будет подчиняться уравнению

$$\frac{d(N_1 + N_2)}{dt} = \mu \left(\frac{N_1(K_1 - N_1)}{K_1} + \frac{N_2(K_2 - N_2)}{K_2} \right). \quad (9.2)$$

Из последнего уравнения (9.2) видно, что суммарная численность популяции, разделенной на несколько ареалов проживания, даже в простейшем случае не описывается уравнением Ферхюльста (3.7). Это достаточно понятно, учитывая, что логистическое

уравнение является нелинейным, следовательно, для него не выполняется принцип суперпозиций. Уравнение (9.2) может быть приведено к виду уравнения (7.7) только (если положить $N = N_1 + N_2$, $K = K_1 + K_2$) в случае полного «синхронизма» состояния обеих подсистем, когда имеет место соотношение

$$\frac{N_1}{K_1} = \frac{N_2}{K_2} = n. \quad (9.3)$$

Если же условие синхронизма (9.3) не выполняется, уравнение (9.2), описывающее динамику суммарной численности обеих популяций, никоим образом не может быть приведено к уравнению Ферхюльста. Теперь понятно, что единственное уравнение Ферхюльста не сможет количественно описать динамику сложной большой демографической системы, например население таких больших стран, как США или Россия, и тем более население всего земного шара. Понятно также, в каком направлении необходимо модифицировать модель: первым приближением могло бы стать рассмотрение суммы решений нескольких логистических уравнений:

$$N(t) = \sum_i N_i(t), \quad (9.4)$$

где каждое $N_i(t)$ есть решение логистического уравнения

$$\frac{dN_i}{dt} = k_i \frac{N_i(K_i - N_i)}{K_i}, \quad (9.5)$$

где k_i , K_i — константы, которые могут быть определены, например, из анализа статистических данных.

Следующим приближением может стать рассмотрение связанных уравнений (9.5). В вышеописанных случаях подразумевается, что население страны формально разбивается на несколько групп, каждая из которых соответствует населению некоторой территориальной единицы. Для уже рассмотренного в главе 3 примера Соединенных Штатов Америки логично в качестве территориальной единицы выбрать штат. Динамика численности каждой из таких групп (штатов) подчиняется логистическому уравнению. Формально можно сказать, что население каждого штата предполагается сосредоточенным в одном центре, причем в последнем случае центры связаны друг с другом.

Можно, однако, рассмотреть случай, когда население распределено по ареалу проживания непрерывным образом. В этом случае необходимо рассматривать плотность населения $n(r, t)$, где r — координаты точки ареала проживания, а t — время. Плотность населения — это число человек, проживающих на единице площади территории заселения. Локально (в каждой точке r территории заселения) рост численности населения будет описываться логистическим уравнением вида

$$\frac{\partial n}{\partial t} = k(r) \frac{n(K(r) - n)}{K(r)}, \quad (9.6)$$

где $K(r)$ — максимально возможная плотность населения в точке r ареала. Суммарная численность населения на всей территории проживания будет определяться интегралом:

$$N(t) = \int_S n(\mathbf{r}, t) dS, \quad (9.7)$$

где S — территория проживания.

Следующим логичным шагом является учет миграции внутри страны. Ее можно описывать различными способами, но наиболее традиционным способом описания подобных процессов является введение диффузионного слагаемого $D\nabla^2 n$ (Рабинович и др., 2001) в правую часть уравнения (9.6):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = k \frac{n(K - n)}{K} + D\nabla^2 n. \quad (9.8)$$

Уравнение (9.8) является хорошо известным в синергетике (можно даже сказать эталонным) нелинейным уравнением диффузии, где вместо первого слагаемого может быть любая функция, удовлетворяющая некоторым условиям (Трубецков, 1997), а D — коэффициент диффузии, характеризующий миграцию населения по ареалу проживания.

Ради простоты и наглядности рассмотрим одномерную задачу. Будем полагать, что население распределено вдоль одной оси x , а параметры K и k являются везде одинаковыми, не зависят от координаты. Тогда уравнение (9.6) примет вид:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = k \frac{n(K - n)}{K} + D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}. \quad (9.9)$$

Это достаточно сложное для анализа нелинейное уравнение, но в основе его лежит снова уже хорошо знакомое логистическое уравнение.

Следует отметить, что пространственное распределение введено в «диффузионную» модель (9.9) для «рассинхронизации» динамики «логистической» популяции в различных точках ареала проживания. Принципиально важную роль играет именно временное рассогласование изменения численности популяции в различных точках, поэтому в рамках простейшей модели максимально возможная плотность населения K полагается постоянной, не зависящей от пространственной координаты.

Не будем останавливаться на подробностях решения уравнения (9.9). Желая уточнить особенности решения уравнения (9.9) применительно к расчету динамики численности народонаселения можно порекомендовать познакомиться с работой (Короновский и др., 2008). На рис. 9.1 (а) показано, как эволюционирует с течением времени нормированное распределение плотности населения $n(x, t)$, а на рис. 9.1 (б) приведен профиль этого распределения в фиксированный момент. Видно, что на правой границе рассматриваемого пространственного интервала ($x = 1$) плотность населения нарастает быстрее, чем на левой, следовательно, в рассматриваемой системе присутствует рассинхронизм нарастания численности населения в различных точках ареала проживания.

Суммарную численность населения $N(t)$ для сопоставления с реальными ста-

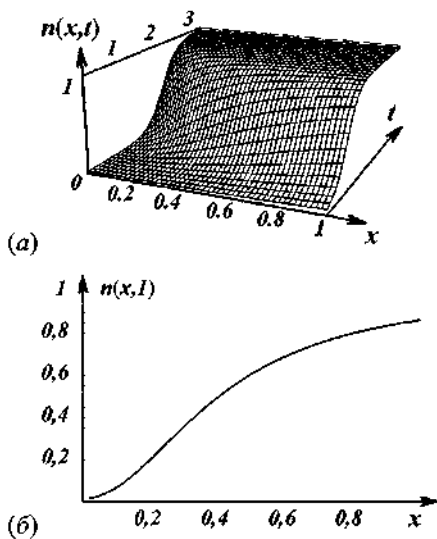


Рис. 9.1. Иллюстрация эволюции распределения плотности населения: (а) Изменение с течением времени нормированного распределения плотности $n(x, t)$ при значениях управляющих параметров $D = 0,01$, $k = 5,1$, $K = 1$. Начальное распределение было выбрано в виде $n(x, 0) = 8,33(3) \cdot 10^{-5} + 0,0375x^2$, а в качестве граничных условий рассчитывались логистические уравнения на левой $x = 0$ и правой $x = 1$ границах; (б) распределение плотности населения в начальный момент безразмерного времени, соответствующий 1990 году

статистическими данными можно найти по формуле (9.7), которая для нормированных величин переписывается в виде:

$$N(t) = N_0 \int_0^1 n(x, t) dx, \quad (9.10)$$

где $N_0 = 4,725 \cdot 10^8$ выбрана из условия соответствия решения реальным статистическим данным в начальный момент безразмерного времени.

Рассмотрим результаты применения модели, основанной на нелинейном уравнении диффузии, к описанию роста численности народонаселения США. На рис. 9.2 приведена зависимость $N(t)$ (сплошная линия), определенная по формуле (9.10) на основании численного решения нелинейного уравнения диффузии (9.12) с наложенными на нее реальными статистическими данными переписи населения (точки на рис. 9.2). Видно, что предложенная распределенная модель существенно лучше описывает динамику численности населения США, чем уравнение Ферхюльста (см. главу 7). Предложенная в работе (Короновский и др., 2008) распределенная модель, как и логистическое уравнение (7.7), предсказывают насыщение численности населения на некотором уровне. Однако сравнивая кривые на рис. 7.6 и 9.2, можно видеть, что насыщение должно произойти существенно позже, чем предсказывает уравнение Ферхюльста. Понятно, что это обусловлено учетом пространственной распределенности популяции. На наш взгляд, данный вывод намного более реалистичен, чем предсказания уравнения Ферхюльста.

Итак, предложенная модель, основанная на нелинейном уравнении диффузии, хорошо описывает как качественно, так и количественно численность народонасе-

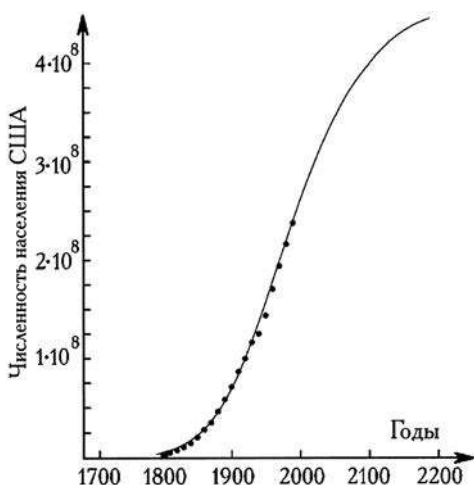


Рис. 9.2. Результаты расчета динамики численности населения США, базирующиеся на нелинейном уравнении диффузии (9.9) и известных демографических данных

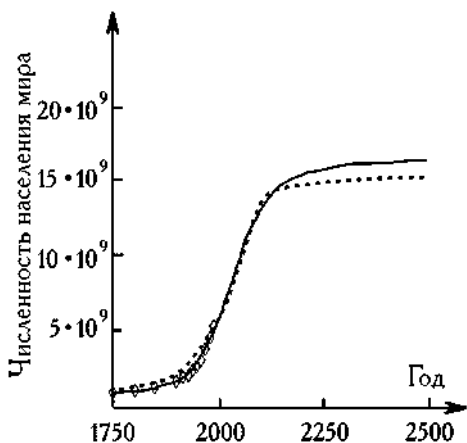


Рис. 9.3. Численность населения мира: символы — статистические данные; штриховая линия — предсказания феноменологической модели гиперболического роста, предложенной С.П. Капицей (Капица, 1999); сплошная линия — результаты, полученные с помощью нелинейного уравнения диффузии (9.9)

ления, что проиллюстрировано на примере США. Совершенно резонно возникает вопрос о том, можно ли описать с помощью модели, основанной на нелинейном уравнении диффузии и уравнении Ферхюльста, динамику численности населения всего мира в целом.

На рис. 9.3 показаны результаты расчета динамики численности населения мира с помощью нелинейного уравнения диффузии (9.9) (сплошная линия), а также для сравнения нанесены реальные статистические данные до 1990 г. Из рисунка видно, что модель (9.9) хорошо соответствует реальным статистическим данным. Особенностью расчета было предположение о неоднородной максимально возможной плотности населения $K = K(x) \neq \text{const}$. Оно обуславливается такими факторами, как различные климатические и географические условия, различный экономический уровень развития той или иной территории и т.д.

Наиболее интересным и важным является совпадение результатов модели (9.15), базирующейся на нелинейном уравнении диффузии и уравнении Ферхюльста, и феноменологической модели С.П. Капицы (штриховая линия на рис. 9.5), о которой мы подробно поговорим далее в этой главе, не только в области прошедших лет, где данные известны и служат основой для экстраполяции в будущее, но и в области прогноза. Совпадают и скорость роста на этапе демографического взрыва, и численность населения мира на этапе насыщения, и значение времени, когда численность населения стабилизируется. Отметим, что полученный прогноз находится в хорошем соответствии с прогнозом ООН (Haub et al., 1985).

Отметим еще один важный факт: моменты времени, когда прогнозируемая численность населения выходит на стационарный

уровень для США и мира в целом (окончание демографического перехода), совпадают. На наш взгляд, это обстоятельство является еще одним свидетельством в пользу предложенной модели.

9.2. Анализ динамики численности народонаселения отдельных стран и модель «решеточного газа» для объяснения выявленных закономерностей

Из представленного анализа логистического уравнения (уравнения Ферхюльста) и его пространственно-распределенной модификации применительно к анализу глобального процесса роста численности народонаселения одной из крупных стран, а именно США, ясно, что применение логистического уравнения (и его модификаций) является эффективным методом для построения простых демографических моделей роста численности народонаселения отдельных стран, позволяя качественно и иногда и количественно описать реальные статистические данные. Выбор для анализа в предыдущем параграфе именно США связан с доступностью и хорошим качеством демографических данных как по динамике общей численности населения США, так и населения отдельных штатов и даже более мелких административных единиц начиная с 1790 г. К сожалению, таких полных, весьма подробных и доступных данных не существует для других стран, в том числе и для России. Анализ динамики численности народонаселения нашей страны, очевидно, был бы очень важным и полезным для понимания основных тенденций данного процесса, а также для возможности прогноза дальнейшей динамики населения России и отдельных ее частей как на ближайшее время, так и для долгосрочного прогноза на будущее.

Важно также отметить, что ранее мы пришли к выводу: отклонения численности населения от логистического роста определяется фактором «рассинхронизма» динамики отдельных территорий. Этот фактор был учтен с помощью модели нелинейного уравнения диффузии, которая является принципиально распределенной в пространстве. Сопоставляя результаты моделирования с помощью этой модели с реальными статистическими данными, мы сделали вывод о хорошем совпадении прогноза и реального изменения численности народонаселения. Вместе с тем, для лучшего понимания динамики численности народонаселения необходим детальный анализ существующих демографических данных и их

классификации с точки зрения соответствия предлагаемым моделям. Такая классификация, связанная с выделением характерных особенностей в имеющихся демографических данных, позволяет более глубоко понять процессы, связанные с глобальными изменениями численности народонаселения.

Для этого рассмотрим демографические данные роста народонаселения США за период с 1790 по 1990 г., следуя работе (Лопатников и др., 2002). Структура известных демографических данных такова, что численность населения каждого штата представлена с десятилетним интервалом, начиная с момента присоединения штата к США. Имеются данные о динамике численности населения с десятилетним интервалом и в каждом административном округе штата, однако данные такой степени агрегации сложно использовать в исследовании. Это связано в первую очередь со способом представления данных. Все имеющиеся данные собраны в таком виде, что при изменении границ территориальной единицы происходит резкий «скачок» численности населения этой территории. Это существенно затрудняет рассмотрение и требует ретроспективного (исторического) подхода к анализу демографических процессов. Использование в качестве «элементарной» единицы именно штата связано с тем, что на его территории проживает большое число жителей, так что небольшие флуктуации численности, обусловленные локальными демографическими факторами (которые очень сильно влияют на динамику численности более мелких территориальных единиц — округов, графств и т.д.), не оказывают существенного влияния на полную численность его населения. В то же время для штата ещё в первом приближении можно не учитывать пространственную распределенность и неоднородность расселения населения на его территории. Здесь мы снова возвращаемся к дискретной модели, учитывающей «рассинхронизм» временной динамики численности населения различных областей. Такая модель была введена в предыдущем разделе и сводила описание численности страны (в частности, США) к анализу суммы нескольких решений логистических уравнений (см. формулы (9.4) и (9.5)). «Рассинхронизация» во времени динамики населения различных территориальных единиц учитывается в этой модели распределением значений начальных условий для каждого из логистических уравнений (9.7), дающих общую численность населения.

Можно отметить, что, как правило, изменение границ штатов не сильно влияло на численность населения штата. Естественно,

не принимается в рассмотрение случай, когда штат делился пополам, например, из штата Виргиния в 1863 г. выделился штат Восточная Виргиния. Одновременно более мелкие территориальные образования (административные округа) претерпевали значительно более серьёзные изменения (см. рис. 9.4), и данные, «привязанные» к названию соответствующей небольшой территориальной единицы, без учета всех изменений ее границ, не имеют большого смысла (Алешковский, 2010). Поэтому с учетом всего вышеизложенного в основу рассмотрения в данном разделе положены именно штаты.

Предположим, что изменение численности населения США с учетом «рас-синхронизма» во времени может быть представлено в виде суммы решений (9.4) логистических уравнений (9.5) для каждой отдельной территориальной единицы (в нашем случае — штата). Для каждого штата методом наименьших квадратов были найдены параметры k_i и K_i логистического уравнения и начальные условия $N_i(0)$, дающие наилучшее соответствие существующим демографическим данным.

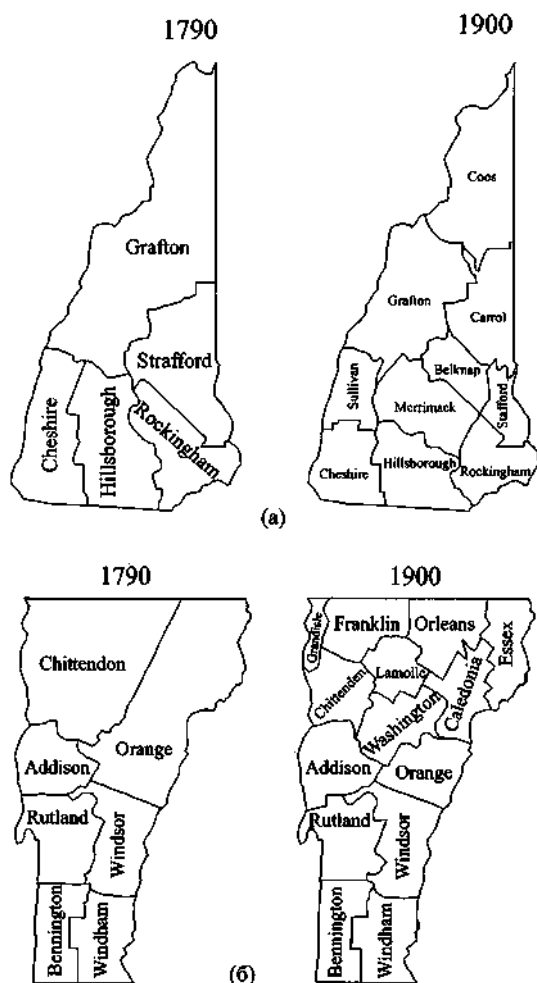


Рис. 9.4. Изменение границ административных округов штатов Вермонт (а) и Нью Хампшир (б)

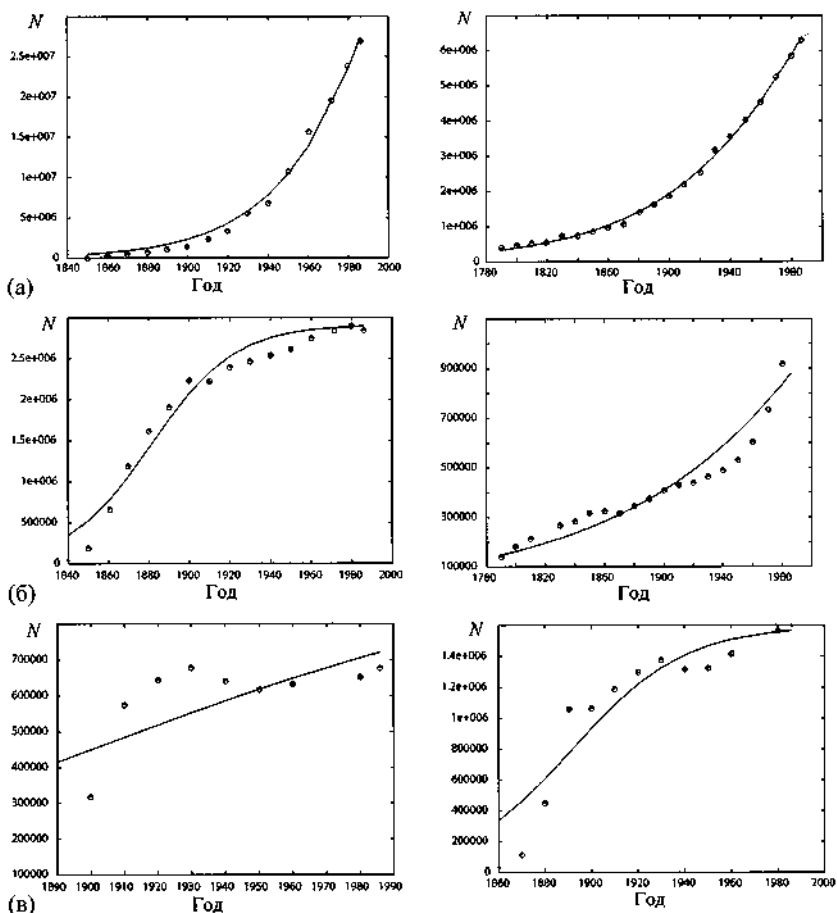


Рис. 9.6. Динамика численности населения (кружки) и ее аппроксимация логистической кривой (линия) для штатов (а) Калифорния и Северная Каролина (группа А); (б) Айова и Нью-Хампшир (группа В); (в) Северная Дакота и Небраска (группа С)

ответствие между датой присоединения штата к США или начала заселения территории штата и соответствия роста численности населения в нем логистическому уравнению. На рис. 9.7 представлена карта, на которой разным цветом показаны годы присоединения различных территорий к США. Время присоединения территории характеризует время начала интенсивного заселения территории. Одновременно на рис. 9.7 жирной линией отмечены те штаты, территория которых вошла в состав Соединенных Штатов

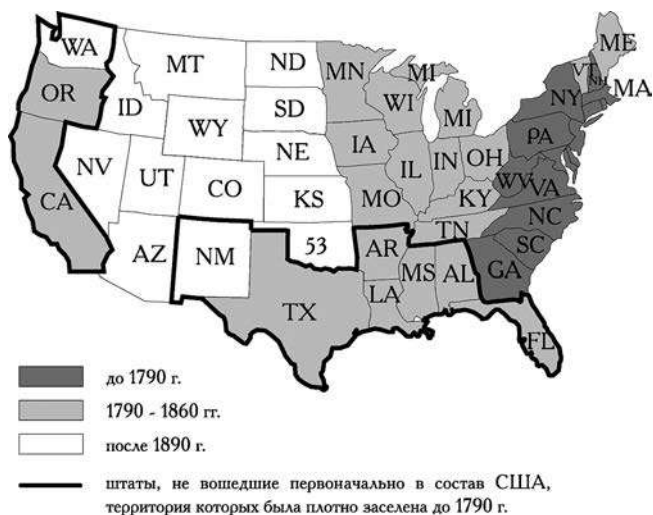


Рис. 9.7. История заселения территории Соединенных Штатов Америки

тов во вторую (в период 1790–1860 гг.) или даже третью (позже 1890 г.) очередь, но которые были к этому моменту уже плотно заселены. Это те территории, которые исторически интенсивно колонизировались с момента заселения европейцами Американского материка.

Если сравнить распределение штатов на группы по степени соответствия демографических данных решению логистического уравнения (рис. 9.5) и карты истории колонизации территории США (рис. 9.7), то можно увидеть, что географическое местоположение штатов группы А (штатов, численность населения которых подчиняется логистическому уравнению) почти идеально соответствует наиболее рано заселенным территориям (области на карте, соответствующие областям, окрашенным темным цветом, и областям, ограниченным жирной линией на рис. 9.7). Одновременно между группами штатов В и С и штатами, которые вошли в состав США позже, также наблюдается определенное соответствие (ср. рис. 9.5 и рис. 9.7 (области, закрашенные светло-серым и белым цветом)).

В группу А входят преимущественно штаты, заселение которых началось в первый период колонизации Американского континента (примерно до 1820 г.) — Флорида, Калифорния, Северная и Южная Каролина, Коннектикут, Нью-Йорк и др. Часть штатов

этой группы были первыми штатами, на территории которых возникли Соединенные Штаты. Другие штаты этой группы вошли в состав США несколько позже. Как уже обсуждалось, для этой группы штатов численность населения как функция времени хорошо описывается решением уравнения Ферхюльста. Кроме того, у этих штатов наибольшая плотность населения и, как следствие, наиболее равномерное распределение населения по территории.

Вторая группа (группа В) охватывает штаты, присоединенные в период с 1822 по 1861 г. Штаты этой группы — внутренние территории, которые вначале были свободными (на них присутствовало только коренное население, плотность расселения которого была мала). Затем началась их колонизация, на этих территориях появлялись переселенцы (освоение Дикого Запада), их количество увеличивалось, и в итоге земли получали статус территорий, на которые правительство США заявляло свои претензии. Далее соответствующие территории получали статус штатов. Среди штатов этой группы — Айова, Миннесота, Иллинойс, Индиана, Арканзас и др. (см. рис. 9.5). Для этих штатов характерно постепенное заселение, численность населения в них сначала обгоняла соответствующую логистическую кривую, а затем отставала от нее, т.е. на графике существует точка перегиба реальной численности популяции относительно соответствующей ей кривой решения уравнения Ферхюльста.

Третью группу составляют штаты, присоединенные существенно позже, после 1890 г. Численность населения для этих штатов далека от насыщения, плотность населения невелика, а ее распределение по территории проживания сильно неравномерно. Поэтому не представляется возможным описать динамику численности населения в этом случае решением логистического уравнения. Другими словами, эти штаты все еще находятся в начале своего интенсивного и более плотного заселения.

Найденные закономерности хорошо соответствуют результатам, полученным в работе (Анфиногентов и др., 2000), в которой рассматривалась принципиальная роль учета неоднородности и запаздывания в заселении различных областей ареала проживания при моделировании динамики населенности больших территорий. Для этого в работе (Анфиногентов и др., 2000) с помощью модели решеточного газа изучался рост численности распределенной в пространстве популяции, и было показано, что динамика численности популяции принципиально определяется характером заселения ареала.

Остановимся несколько подробнее на процедуре построения модели (Безручко и др., 2010). Для этого рассмотрим плоскость, разделенную на квадратные ячейки, каждая из которых будет характеризоваться парой натуральных чисел (i, j) , где число i характеризует положение ячейки (клетки) по горизонтали, j — по вертикали (см. рис. 9.8). В общем случае размер такой структуры может быть сколь угодно большим (даже неограниченным), однако при численном моделировании на компьютере необходимо выбирать некоторые разумные размеры области, в которой анализируется динамика клеточного автомата.

Будем условно называть клетку «живой», если на ней находится фишка, в противном случае клетка считается «мертвой» или «пустой». Зададим правила эволюции такого клеточного автомата, позволяющие описать рождение, эволюцию и гибель «живых» клеток на нашем дискретном пространстве. Особенностью рассматриваемого клеточного автомата является то, что каждая из «живых» клеток кроме своих координат (i, j) характеризуется также временем жизни P_{ij} на решетке (если проводить аналогии с биологической популяцией, то координаты клетки соответствуют местоположению данной особи в ареале проживания, а время жизни соответствует возрасту особи). При превышении некоторого времени жизни T_L клетка исчезает с решетки (особь соответственно умирает). В этом случае на месте элемента возникает свободная клетка. Динамика клетки решетки на каждом шаге T во времени заключается в следующей процедуре.

1. «Смерть особи», занимающей клетку решетки с координатами (i, j) , если $P_{ij} = T_L$ (т.е. «живая» клетка, чье время жизни («возраст») превышает некоторое предельное значение T_L , «умирает»).

2. «Взросление особи»: $P_{ij}[T+1] = P_{ij}[T] + 1$ (т.е. на каждом дискретном шаге возраст «живой» клетки увеличивается на единицу дискретного времени).

3. «Передвижение по ареалу». «Живые» клетки в рассматриваемом кле-

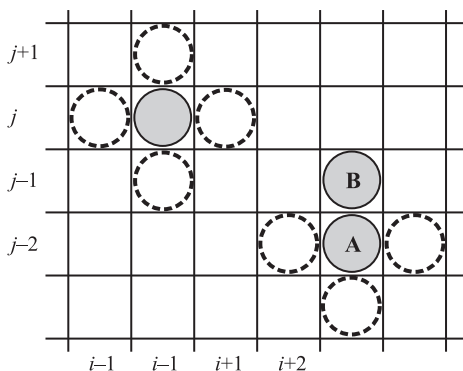


Рис. 9.8. Схема, поясняющая эволюцию живых клеток в клеточном автомате, моделирующей эволюцию биологических популяций

точном автомате могут перемещаться по дискретному «игровому» пространству таким образом, что на каждом временном шаге T клетка смещается по дискретному пространству («игровому» полю) либо на одну ячейку вверх или вниз, либо вправо/влево, причем каждое из четырех возможных направлений перемещения полностью равновероятно. Движение не происходит лишь в том случае, когда все из четырех соседних клеток заняты другими элементами. Это иллюстрирует рис. 9.8, на котором показаны возможные перемещения «живой» клетки, имеющей координаты (i, j) — они отмечены на рисунке пунктирными кружками.

4. «Рождение новой особи», которое подчиняется вероятностному закону. Так, около каждого элемента p_{ij} на каждом временном шаге T с вероятностью q возможно возникновение нового элемента с координатами $(l, k) = \{(i+1, j), (i-1, j), (i, j-1), (i, j+1)\}$ и со значением возраста $P_{l,k} = 1$. Причем каждая из координат полностью равновероятна. Это иллюстрирует рис. 9.9, на котором для «живой» клетки, отмеченной символом **A**, указаны места (пунктирными кружками) возможного рождения новых «живых» клеток. Отметим, что если одно из мест вблизи «живой» клетки занято другой «живой» клеткой (клетка **B** на рис. 9.8), то в этом месте рождение новой клетки невозможно. Если все из четырех соседних клеток заняты другими элементами, то рождение новой клетки вообще не происходит (можно сказать, что имеет место перенаселенность).

Подобные клеточные автоматы иногда еще называют «клеточными газами». Одним из первых определений клеточного газа было следующее: «Решеточный газ есть набор “атомов”, положение в пространстве каждого из которых может принимать только дискретные значения. Это дискретное положение атома на каждом последующем дискретном шаге во времени определяется геометрией решетки, которая в свою очередь определяется ближайшими N соседями каждой клетки решетки. В каждой клетке может находиться не более одного атома...» (Huang, 1963).

С помощью подобного решеточного газа рассматривалась динамика различных популяций, распределенных как однородно, так и неоднородно в ареале проживания (Анфиногентов и др., 2000). Приведем некоторые основные результаты такого анализа, иллюстрирующие представленные в этой главе данные динамики численности населения различных штатов Америки. В случае, изначально близкому к однородному по плотности расселению на некоторой территории, динамика численности населения хорошо

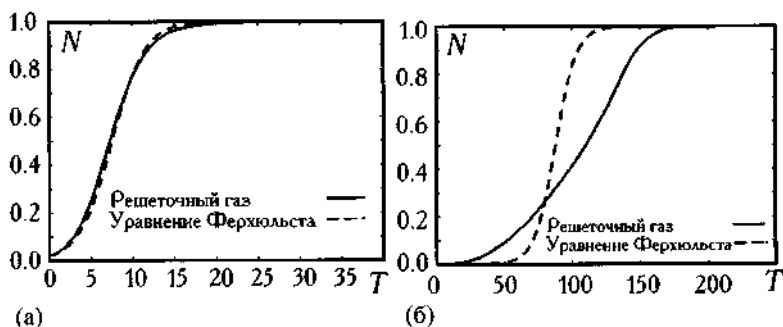


Рис. 9.9. Динамика суммарной численности «модельной» популяции, рассчитываемой с помощью решеточного газа (сплошная линия), и ее сравнение с решением уравнения Ферхюльста (пунктир) для начального распределения особей популяции близкого к (а) однородному и (б) сильно неоднородному

описывается решением логистического уравнения (рис. 9.9 (а)). Причем соответствие тем лучше, чем ближе к однородному начальное распределение населения. Ситуация усложняется при сильной начальной неоднородности (например, когда происходит заселение ареала проживания извне). В этом случае наблюдаются отклонения роста численности популяции от соответствующего решения логистического уравнения (рис. 9.9 (б)). Причем вид этих отклонений подобен процессам в штатах, включенных в группу В: сначала наблюдается более быстрый рост населения (связанный с миграцией), что предсказывает логистическое уравнение, а затем он резко замедляется (ср. рис. 9.6 (б) и рис. 9.9 (б)).

Для подтверждения полученных закономерностей в динамике численности населения различных штатов США был проведен анализ зависимости удельной емкости ρ_i территорий, на которых проживает население различных штатов, от времени начала заселения соответствующей территории. Для каждого штата i удельная емкость определялась как отношение емкости среды, т.е. максимальной численности населения, которое может проживать на территории данного штата, к его площади S_i

$$\rho_i = K_i/S_i. \quad (9.11)$$

В качестве емкости среды (максимального числа жителей, которые могут проживать на территории штата) K_i бралось значение, полученное из аппроксимации демографических данных решением логистического уравнения (9.6).

Величина удельной емкости является в некотором смысле характеристикой привлекательности той или иной территории для проживания на ней населения. Дело в том, что применительно к народонаселению понятие емкости среды K не является в чистом виде той максимальной численностью населения, которое может проживать на рассматриваемой территории. Такая характеристика, как максимальная численность, видимо, вообще не может быть применима к человеческой популяции. Например, в крупных мегаполисах плотность населения на несколько порядков превосходит плотность населения в сельской местности. Поэтому для человеческого общества если и имеет смысл говорить о величине максимальной численности, то в усредненном виде, подразумевая ту или иную территорию (штат, область, округ, даже страну). Эта величина будет определяться географическими (ландшафт, климат и т.д.), экономическими, политическими и другими факторами.

Максимальная численность населения той или иной страны имеет тенденцию возрастать с развитием экономики и научно-технического прогресса. Поэтому величину удельной емкости следует рассматривать как некоторую усредненную по территории характеристику привлекательности штата для проживания населения на его территории. В этом случае оценка параметра K логистического уравнения для различных штатов позволяет объективно выявить наиболее предпочтительные для населения земли США. Более того, эта оценка является усредненной за все время существования штата, так как параметр емкости среды K определяется по демографическим данным от начала присоединения штата до сегодняшнего времени.

В результате проведенных исследований было показано, что по значению удельной емкости ρ все штаты могут быть снова разделены примерно на три группы, причем наибольшую удельную емкость имеют штаты, заселенные ранее всего, а наименьшую — заселенные в последнюю очередь. В табл. 1 показаны значения удельных емкостей для штатов, динамика численности населения которых характерна для каждой из групп соответствия решению логистического уравнения.

Заметим, что при расчете и анализе удельной емкости невозможно столь точно, как это было сделано выше, провести классификацию штатов. Границы групп с различной удельной емкостью пересекаются; имеются штаты, удельная емкость которых не под-

Таблица 1

**Значения удельной емкости
территорий штатов, входящих
в различные группы**

Штат	ρ , человек/миль ²
Группа А	
Калифорния	61,25
Северная Каролина	114,07
Нью-Йорк	144,90
Группа В	
Айова	18,95
Мэн	10,19
Джорджия	28,20
Группа С	
Северная Дакота	3,8
Небраска	1,02
Вайоминг	2,34

чиняется вышеописанным закономерностям. Однако общая тенденция выделения именно трех характерных групп, первоначально определенных с использованием методов нелинейной динамики на основе моделирования логистического уравнения, все же прослеживается.

Высокие значения удельной емкости населения, соответствующие штатам группы А, свидетельствуют о том, что в этих штатах численность населения близка к предельному значению, определяемому емкостью среды *K*. И наоборот, малые значения удельных плотностей штатов группы С свидетельствуют о том, что данные штаты находятся еще

в самом начале «логистического» роста населения, проживающего на их территории.

Базируясь на степени соответствия реальных демографических данных по динамике численности населения различных штатов США решению логистического уравнения, было показано, что все штаты делятся на три основные группы. Данная классификация подтверждается как историей заселения США, так и расчетами удельной емкости населения («привлекательности») каждого из штатов. Суммируя, можно заключить, что первая группа штатов (группа А) соответствует штатам, заселение которых началось с момента колонизации Американского материка, и численность населения в некоторых из них приближается к предельной, определяемой емкостью среды *K*. Вторая группа (группа В) — это штаты, территории которых заселялись переселенцами из штатов первой группы. Поэтому сильная неоднородность начального распределения населения по территории и рассинхронизация заселения их привела к отличиям в динамике населения в них от предсказываемого уравнением Ферхюльста. Последняя группа штатов

(группа С) соответствует территориям, численность населения которых не подчиняется логистическому уравнению, а емкость (или «привлекательность») которых очень мала.

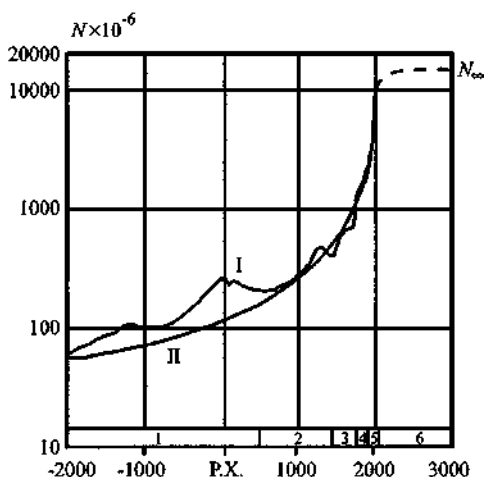
Таким образом, представленные в данной главе подходы к построению модифицированной модели на базе логистического уравнения и модели класса «решеточного газа» для корректного моделирования процессов роста народонаселения, основанные на гипотезе о «рассинхронизме» развития и динамики различных небольших по сравнению со всей страной территорий и на необходимости описывать суммарную численность населения как сумму решений логистических уравнений с различными начальными условиями, нашли хорошее подтверждение в совместном историко-демографическом исследовании, проведенном в работах (Анфиногентов и др., 2000; Лопатников и др., 2002) и изложенном в данном разделе.

9.3. Феноменологическая модель С.П. Капицы роста населения мира

В настоящее время основное внимание привлечено к стремительному росту населения Земли. Темп роста все увеличивается и настолько велик, приближаясь к 100 млн в год, что его стали характеризовать как демографический взрыв, способный потрясти планету. Такое увеличение населения мира требует все возрастающего производства пищи и энергии, потребления минеральных ресурсов и приводит к увеличивающемуся давлению на биосферу планеты (рис. 9.10).

Возрастающий и безудержный рост населения

Рис. 9.10. Численность народонаселения мира. I — демографические данные, II — режим с обострением. Временные интервалы: 1 — Древний мир, 2 — Средние века, 3 — Новая история, 4 — Новейшая история, 5 — демографический переход, 6 — стабилизация населения (Капица, 1999)



Земли, если его наивно экстраполировать в будущее, приводит к тревожным прогнозам и даже апокалиптическим сценариям для глобального будущего человечества. В этих условиях поиск альтернативных подходов и исследования развития за возможно более длительный промежуток времени могут открыть путь к более глубокому пониманию эволюции человечества и того критического состояния, в котором оно находится в настоящее время.

Несмотря на всю драматичность демографического взрыва и часто очень эмоциональную реакцию, которую он вызывает, существенно то, что человечество переживает демографический переход (см. рис. 9.10). Это явление состоит в резком возрастании скорости роста популяции, сменяющемся затем столь же стремительным его уменьшением, после чего численность населения страны стабилизируется. Этот этап уже пройден развитыми странами, и теперь такой процесс происходит в развивающихся странах. Демографический переход сопровождается ростом производительных сил и перемещением значительных масс населения из сел в города.

При завершении перехода наступает резкое изменение возрастного состава населения. Распределение населения по возрасту и полу обычно представляют в виде диаграмм, на которых наглядно видно, как изменяется состав населения. Эти распределения мало менялись, и только на этапе демографического перехода наблюдается качественное изменение распределения населения по возрасту. От пирамиды, характерной для периода роста, осуществляется быстрый переход к столбообразному распределению, при котором рост населения практически прекращается (рис. 9.11).

Рассмотрим феноменологическую математическую модель гиперболического роста численности населения Земли, которую в своих работах создал С.П. Капица (Капица, 1996; Капица, 1999; Капица, 2010).

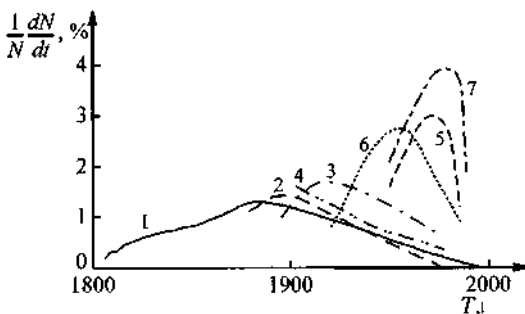


Рис. 9.11. Прохождение странами демографического перехода. 1— Швеция, 2 — Германия, 3 — СССР (Россия), 4 — США, 5 — Маврикий, 6 — Шри-Ланка, 7 — Коста-Рика. Данные графиков сглажены (Капица, 1999)

Пусть население мира в момент времени T характеризуется числом людей $N(T)$. Процесс роста будет рассматриваться на значительном интервале времени — очень большом числе поколений. В этом случае можно ожидать, что сама длительность поколения — продолжительность жизни человека — не будет явно входить в расчет, как и распределение людей по возрасту и полу.

В системном анализе тогда, когда имеются многофакторный процесс и множество степеней свободы, следует ожидать, что рост происходит самоподобно. При этих условиях в основе моделирования лежит предположение о его однородной по времени автомодельности, что выражается в масштабной инвариантности этого процесса.

Сергей Петрович Капица (1928–2012) родился 14 февраля 1928 в Кембридже. С.П. Капица принадлежит к династии русских ученых, сын лауреата Нобелевской премии П.Л. Капицы, внук А.Н. Крылова, русского математика и кораблестроителя, и внучатый племянник известного французского биохимика В.Н. Анри (Крылова) (по линии матери, Анны Алексеевны). В 1935 г. семья Капицы переезжает в СССР, и с этого времени Капица живёт в Москве. Учился в Московском авиационном институте. Свою научную деятельность начал в 1949 г. Работал в таких областях физики, как сверхзвуковая аэродинамика, земной магнетизм, прикладная электродинамика, физика элементарных частиц. С 1956 г. Сергей Капица преподавал в Московском физико-техническом институте (МФТИ). В 1961 г. стал доктором физико-математических наук. В 1965 г. в этом же институте получил звание профессора. В 1965–1998 гг. на кафедре физики преподавал общую физику студентам первых трёх курсов. Создатель феноменологической математической модели гиперболического роста численности населения Земли.



Президент Евразийского физического общества, член Европейской академии наук, член Совета при Президенте РФ по культуре и искусству. Член Римского клуба, президент междисциплинарного дискуссионного клуба «Никитский клуб учёных и предпринимателей России», член Манчестерского литературного и философского общества. Лауреат премии Калинги (ЮНЕСКО), лауреат Государственной премии СССР, лауреат премии РАН за популяризацию науки. Многолетний ведущий телевизионной передачи «Очевидное — невероятное».

Смысл этой основной гипотезы состоит в том, что утверждает-ся постоянство относительной скорости роста системы

$$\lim_{\Delta N, \Delta T \rightarrow \infty} \frac{\Delta N}{N - N_1} \frac{T - T_1}{\Delta T} = \frac{d(\ln|N - N_1|)}{d(\ln|T - T_1|)} = \alpha, \quad (9.12)$$

где N_1 и T_1 — опорные значения численности и времени. В большинстве случаев можно считать, что $N_1 = 0$.

Соотношение (9.12) приводит к тому, что самоподобный рост с необходимостью должен описываться степенными законами вида $N = C(T_1 - T)^\alpha$, где C и α — константы. В таких самоподобных процессах проявляется постоянство отношений изменений численности населения и времени. Простейший, но далеко не единственный пример такого рода — линейный рост, когда $\alpha = 1$. Рост по геометрической прогрессии (экспоненциальный рост) или развитие по логистическому закону этому условию уже не удовлетворяет, так как появляется внутренний масштаб времени — время удвоения и масштабной инвариантности, т.е. скейлинга нет.

Поиск автомодельного решения есть первый шаг в создании модели, и для описания роста населения мира Форстер (Foerster, 1960) предложил эмпирическую формулу

$$N = \frac{179 \cdot 10^9}{(2027 - T)^{0.99}}, \quad (9.13)$$

где соответствующие значения постоянных

$$C = (179 \pm 0,14) \cdot 10^9, T_1 = 2027 \pm 5, \alpha = 0,99 \pm 0,009$$

получены в результате статистической обработки методом наименьших квадратов большого объема данных по населению мира от Рождества Христова (Р.Х.) до 1960 г. Точность предложенного значения для α представляется несколько преувеличенной. В дальнейшем будет принято значение $\alpha = 1$. Заметим, что позднее Хорнер (Horner, 1975) предложил аналогичное выражение

$$N = \frac{C}{T_1 - T}, \quad (9.14)$$

где $C = 200 \times 10^9$, $T_1 = 2025$, $\alpha = 1$. Приведенные формулы с удивительной точностью описывают рост населения Земли в течение сотен и даже многих тысяч лет.

Это выражение описывает рост как процесс самоподобного развития, следующий гиперболическому закону эволюции, так называемый режим с обострением (рис. 9.10), подробно изучен-

ный в современных исследованиях нелинейных явлений. Таким образом, демографический взрыв представляется как глобальная системная неустойчивость, характерная для роста существенно нелинейных систем.

Однако выражения (9.13) и (9.14) тем не менее принципиально ограничены некоторой областью, где они применимы. Во-первых, по мере приближения к $T_1 = 2025$ г. население мира будет стремиться к бесконечности. Во-вторых, применительно к прошлому получается столь же абсурдный результат, так как 20 млрд лет тому назад при сотворении Вселенной должно было присутствовать 10 человек.

Таким образом, автомодельное решение (9.13) ограничено как в будущем, так и в прошлом, и справедливо поставить вопрос: где границы его применимости? Действительно, теория автомодельных процессов указывает на то, что такие степенные решения верны только как промежуточно асимптотические. Иными словами, предложенные выражения применимы только в определенной области, которую и следует установить.

Для этого обратимся к тем 10 старцам, которые предположительно жили 20 млрд лет тому назад. Если бы такие космологи и существовали, то они должны были бы жить по миллиарду лет, что так же нелепо, как и сам факт их бытия. Стремительный рост человечества по мере приближения к T_1 означает, что его численность должна была бы удваиваться в 2024 г. за один год, что в равной степени невозможно, поскольку предельная скорость роста населения также ограничена.

Иными словами, фактор, который следует учесть, есть время, характеризующее жизнь человека — его репродуктивную способность и продолжительность жизни. В начальный период роста, когда N мало, при T_0 (начало роста народонаселения), минимальная скорость роста численности населения мира не может быть меньше появления одного человека за характерное время τ . Аналитически это может быть записано в виде:

$$\left(\frac{dN}{dT} \right)_{\min} \Big|_{\substack{N \rightarrow 1 \\ T \rightarrow T_0}} \geq \frac{1}{\tau}. \quad (9.15)$$

Это условие следует рассматривать как приближенное представление непрерывности, пригодное для описания начального развития. На этапе прохождения демографического перехода и по мере приближения к T_1 должна быть ограничена максимальная

скорость роста, когда приращение населения мира за характерное время τ не может быть больше самого населения:

$$\frac{N}{\tau} \geq \left(\frac{dN}{dT} \right)_{\max} \Big|_{T \rightarrow T_1}. \quad (9.16)$$

Соотношения (9.15) и (9.16) указывают на то, что предельный переход (9.12) невозможен, так как непрерывность числа людей ограничена целыми числами (в пределе — одним человеком), а время — характерным временным интервалом, временем человека τ , имеющим размерность (время/человек).

Для того чтобы устранить указанные ограничения и математические особенности развития автомодельного роста, С.П. Капца предлагает разбить весь период развития человечества на три эпохи (названные им соответственно эпохами А, В и С). Во время эпохи В изменение численности народонаселения мира описывается соотношением (9.14) (численные значения параметров будут несколько иными, чем предложил Хорнер). Дифференцируя соотношение (9.14) по времени T , находим, что скорость роста народонаселения мира в эту эпоху будет определяться соотношением

$$\frac{dN}{dT} = \frac{C}{(T_1 - T)^2} = \frac{N^2}{C}. \quad (9.17)$$

Чтобы во время эпохи А выполнялось требуемое условие (9.15), для скорости роста численности народонаселения мира соотношение (9.17) должно быть скорректировано:

$$\frac{dN}{dT} = \frac{N^2}{C} + \frac{1}{\tau}. \quad (9.18)$$

Аналогичным образом с учетом условия (9.13) корректируется скорость роста для эпохи С.

$$\frac{dN}{dT} = \frac{C}{(T_1 - T)^2 + \tau^2}. \quad (9.19)$$

Итак, после введения в модель характерного времени жизни человека как феноменологического микроскопического параметра удается не только определить границы применимости (9.12), но и продолжить это решение как в прошлое, охватывающее всю исто-

рию человечества от T_0 до T_1 , так и в предвидимое будущее. Эпохи А, В и С последовательно сменяют друг друга, причем на границах эпох соответствующие решения уравнений (9.17)–(9.19) (сначала на границе эпох А и В решения соотношений (9.17) и (9.18), затем на границе В и С — решения уравнений (9.18) и (9.19)) должны «сшиваться». Значения же постоянных, определяющих решение, получаются на основе сравнения современных демографических данных с расчетами по формуле, полученной интегрированием (9.19):

$$N = \frac{C}{\tau} \operatorname{arccctg} \left(\frac{T_1 - T}{\tau} \right). \quad (9.20)$$

Соотношение (9.20) описывает демографический переход и будущее развитие человечества (эпоху С). Для констант, входящих в соотношения (9.17)–(9.29), в работе (Капица, 1999) методом наименьших квадратов были подобраны следующие значения:

$$C = (185 \pm 1) \times 10^9, T_1 = 2005 \pm 1, \tau = 45 \pm 1, \\ K = \sqrt{C/\tau} = 64\,100 \pm 1000, \quad (9.21)$$

где K — безразмерная константа роста, играющая важную роль в описываемой модели. Фактически все количественные оценки, следующие из этой модели, могут быть выражены через две величины — константу роста K и характерное время жизни человека τ .

Можно было бы ввести в рассмотрение два значения для τ — одно для начальной эпохи и другое — для эпохи демографического перехода. Но, как полагает автор модели, оценка начала развития $T_0 = 5,4$ млн лет тому назад, полученная при значении характерного временного масштаба $\tau = 45$ годам, вполне удовлетворительно отвечает данным палеоантропологии, и поэтому нет никакого смысла во введении второго значения для феноменологической постоянной и можно ограничиться одним значением для τ .

Таким образом, вся история развития человечества и роста народонаселения мира, согласно модели С.П. Капицы, может быть представлена следующим образом (см. рис. 9.13): самая ранняя и наиболее продолжительная эпоха линейного роста (эпоха А) началась в момент времени $T_0 = T_1 - \pi K \tau / 2 = 4,5$ млн лет тому назад, ее длительность составляла $\Delta T_A = K \tau = 2,9$ млн лет, к ее завершению численность народонаселения мира составляла $N_{A,B} = K \tau g 1 = 10^5$ человек. Следующая эпоха гипербо-

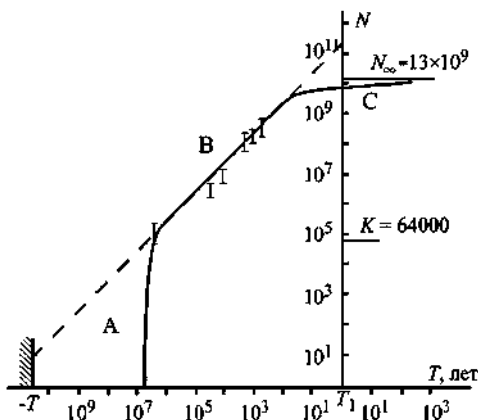


Рис. 9.13. Рост населения мира на всем протяжении развития человечества в двойном логарифмическом масштабе. Пунктиром показано соотношение (9.16). По оси абсцисс отложено время T в годах, отсчитываемое от $T_1 = 2005$ г., по оси ординат — численность людей N , начиная с одного человека. На графике приведены оценки населения мира в разные годы, данные разными авторами
Источник: Капица, 1999.

лического роста В продолжалась $\Delta T_B = (\pi/2 - 1)K\tau = 1,6$ млн лет и закончилась за $\tau = 45$ лет до критической даты $T_1 = 2005$ г. в 1960 г., при этом численность народонаселения мира составляла $N_{BC} = \pi K^2/4 = 3,22$ млрд человек. Демографический переход занимает $2\tau = 90$ лет и закончится соответственно в $T_1 + \tau = 2050$ г. С демографического перехода начинается эпоха С — переход к стабилизированному состоянию. Как следует из модели, численность народонаселения в стабилизированном состоянии составляет $N_\infty = \pi K^2 = 13$ млрд человек. В критическом 2005 г. население мира в соответствии с предсказаниями модели должно достичь половины предельной величины $N_1 = \pi K^2/2 = 6,5$ млрд человек, а скорость роста населения достигнет максимума и будет составлять $K^2/\tau = 90$ млн человек в год.

Заметим, что оценка стабилизированной численности населения $N_\infty = \pi K^2 = 13$ млрд человек, получающаяся в рамках описываемой модели, находится в хорошем соответствии с прогнозом ООН, а также, как отмечалось в разд. 4.3, с другой моделью динамики численности народонаселения мира, опирающейся на нелинейное уравнение диффузии и логистическое уравнение (Короновский и др., 2000).

9.4. Динамика роста мировой урбанизации

Важно отметить, что режимы с обострениями демонстрирует и динамика роста численности населения земного шара, живущего в городах (Коротаев и др., 2010). В работе (Коротаев и др., 2007) была предложена простая модель, описывающая глобальную ди-

намику урбанизации, базирующаяся также на модификации логистического уравнения

$$\frac{du}{dt} = kS(u)u(u_{\max} - u), \quad (9.22)$$

где u — доля городского населения; $S(u)$ — «избыточный» продукт, производимый при данном уровне технологического развития общества, на одного человека; k — константа; $u_{\max}$ — предельно возможная доля городского населения. Как показано в монографии (Коротаев и др., 2010), данная модель предсказывает, что в эпоху быстрого технологического развития наблюдаются режимы с обострением, когда гиперболический рост мировой урбанизации сопровождается квадратично-гиперболическим ростом городского населения мира. Это подтверждается известными статистическими данными и эмпирическими оценками.

На рис. 9.14 показана динамика численности городского населения мира (в млн человек) для городов и городских поселений (с численностью не менее 10 000 человек) за период с 5000 г. до н.э. до 1990 г. н.э. Точки на рисунке соответствуют эмпирическим оценкам Моделски (Modelski, 2003), Грюблера (Grubler, 2006) и отдела народонаселения ООН (UN population division, 2010). Сплошная линия соответствует эмпирической зависимости

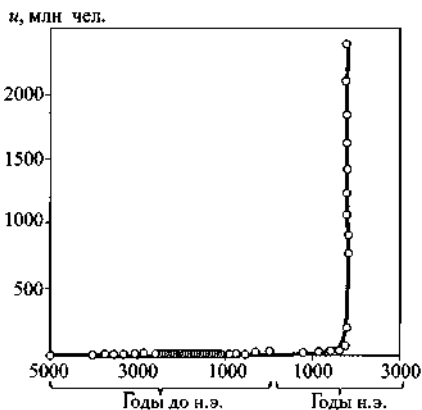
$$u(t) = \frac{C}{(T - t)^2} \quad (9.23)$$

где константы $C = 7\,705\,000$ и $T = 2047$ определены методом наименьших квадратов.

Аналогичное поведение демонстрируют и крупные города (численностью населения более 250 тыс. человек). На рис. 9.15 показаны соответствующие известные статистические демографиче-

Рис. 9.14. Динамика численности городского населения для городов и городских поселений (с численностью не менее 10 000 человек) за период с 5000 г. до н.э. до 1990 г. н.э.)

Источник: Коротаев и др., 2010.



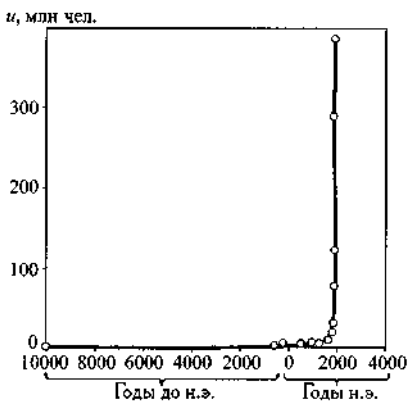


Рис. 9.15. Динамика численности городского населения крупных городов (с численностью не менее 250 тыс. человек) за период с 10 000 г. до н.э. до 1960 г. н.э.)

Источник: Коротаев и др., 2010.

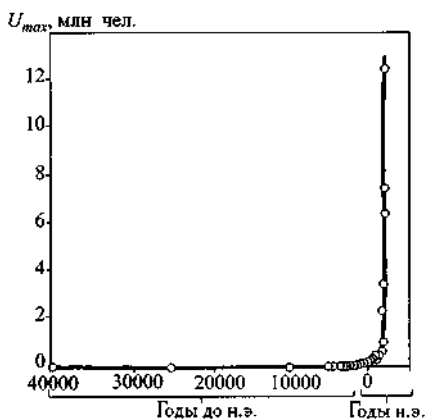


Рис. 9.16. Динамика численности крупнейшего в каждую эпоху поселения за период с 10 000 г. до н.э. до 1950 г. н.э.

Источник: Коротаев и др., 2010.

ские данные (White et al, 2007; Chandler, 1987; UN population division, 2006) и аппроксимация этих данных зависимостью (9.23). Параметры $C = 403$ и $T = 1990$ определены также методом наименьших квадратов.

Если рассмотреть динамику роста численности населения самого крупного в каждую эпоху города на Земле с 10 000 г. до н.э. до 1950 г. н.э., то мы снова приходим к зависимости, демонстрирующей квадратичный гиперболический рост (9.23) (см. рис. 9.16), где $C = 104\,020\,000$, $T = 2040$. Статистические данные также взяты из работы (Modelski, 2003), также использовались известные статистические данные (UN population division, 2006).

Важно отметить, что исследования урбанизации имеют непосредственное отношение к пониманию изменения и роста социального развития человечества. Как было показано антропологами (Naroll et al., 1976; Levinson et al., 1980), размер самого крупного поселения в доаграрных, аграрных и раннеиндустриальных обществах является важным индикатором общего уровня социокультурной сложности соответствующей системы. Последнее позволяет предположить, что и этот важный показатель растет в эпоху развития в режиме с обострением по квадратично-гиперболическому закону.

В заключение подчеркнем, что в современной демографии существуют различные методы и подходы к моделированию глобального процесса роста народонаселения, среди которых все большую роль начинают играть междисциплинарные методы, развитые в нелинейной динамике. Хорошо известно, что демография является наукой со своими эффективными устоявшимися традиционными методами. Вместе с тем анализ глобальных демографических систем новыми нелинейными методами, развитыми в науке о колебаниях и волнах, в синергетике, теории динамических систем, оказывается весьма эффективным, позволяя обнаружить ряд новых аспектов и закономерностей в глобальной динамике численности народонаселения как отдельных регионов и стран, так и всего мира. Как отмечает С.П. Капица в своей монографии (Капица, 1999), методы нелинейной динамики, или синергетики — науки о сложном, постоянно расширяют сферу своего применения, предоставляя новые возможности для изучения явлений, которые в силу своей сложности требуют различных новых методов. Такой междисциплинарный путь позволит в перспективе ввести в орбиту гуманитарного знания, в первую очередь в историю, социологию, психологию, демографию и т.д., новые понятия и представления, будет способствовать объединению наук, называющих себя точными и естественными, с науками о человеке и обществе.

Но такой подход невозможен без попыток найти нелинейные феномены в динамике человеческого общества, построить качественные нелинейные модели динамики глобальных процессов в нем (Безручко и др., 2010). И демографические системы здесь, как показано в этой главе, являются очень интересными объектами исследований на стыке трех «китов» — синергетики, наук о человеческом обществе и новой науки о глобальных процессах. Более того, ученые в области нелинейной динамики пошли в области демографии дальше простого построения качественных моделей. В ходе исследования глобальной проблемы динамики численности народонаселения начиная с XVII в. учеными последовательно решалась задача построения математических динамических моделей и прогноза с их помощью глобального процесса роста численности народонаселения всего мира. Как следует из материала данной главы, прогнозы численности народонаселения, полученные с помощью различных нелинейных подходов, хорошо согласуются друг с другом. Конечно же, изложенные здесь методы и модели не являются окончательными. Мы надеемся, что эти подходы

найдут в будущем свое дальнейшее развитие, точность прогноза возрастет, что позволит планировать и решать важнейшие задачи, стоящие перед человечеством и связанные с ростом численности населения планеты, нехваткой ресурсов, продовольствия и т.п., а также задачи демографии. В частности, появились модели, где рост населения Земли связывается с технологической (развитие жизнеобеспечивающих технологий) и культурной (увеличение уровня грамотности) эволюцией (Коротаев, 2007, Коротаев, 2005).

9.5. Модели миграции

Рассматривая вопросы построения моделей, описывающих динамику демографических систем, нельзя не остановиться на связанном с ним вопросом учета и моделирования миграции. История анализа миграционных процессов и построения моделей миграции также начинается с XIX в., когда английский ученый Евгений Равенштейн сформулировал на основе статистических данных о миграции в европейских странах и США семь миграционных законов (Ravenstein's Law's of Migration) (Ravenstein, 1885; Lee, 1966):

1) основная часть мигрантов перемещается на небольшие расстояния, при этом происходит смещение населения в направлении крупных промышленных и торговых центров;

2) быстро растущие города притягивают мигрантов из ближайшего окружения (небольших городов и сельских пунктов), освободившиеся места занимают мигранты из более удаленных населенных пунктов. Число переселенцев, зарегистрированное в данном центре «поглощения», будет расти тем медленнее, чем больше расстояние до населения, из которого выходят мигранты, и пропорционально численности этого населения;

3) процесс «рассеивания» противоположен процессу «поглощения» (см. п. 2);

4) каждый основной поток миграции создает свой компенсирующий контрпоток, вследствие чего чистая миграция из пункта А в пункт В всегда будет меньше по сравнению с валовой миграцией между этими пунктами;

5) мигранты, перемещающиеся на большие расстояния, обычно направляются в какой-либо крупный промышленный или торговый центр; масштабы миграции возрастают с развитием промышленности, торговли и особенно с развитием транспорта;

- 6) горожане менее склонны к миграции, чем сельские жители;
- 7) женщины более подвижны, чем мужчины.

Наиболее важное обобщение Равенштейна связано с выводом о том, что экономические причины являются определяющими в процессе принятия решения о миграции (Ravenstein, 1885; Lee, 1966): «Плохие или угнетающие законы, высокое налоговое бремя, непривлекательные климатические условия, неподходящее социальное окружение и даже принуждение (работоторговля, депортация) могут быть причиной и являются причиной миграции, но ни один из этих потоков не может сравниться по величине с миграционными потоками, которые вызваны присущим большинству людей желанием улучшить собственное материальное положение». Большинство из законов Равенштейна не только сохранили, но и усилили свое значение к настоящему времени. Именно на сформулированных им закономерностях базируются многие современные концепции и модели, описывающие миграционные потоки населения.

Рассмотрим некоторые наиболее важные модели миграции. Традиционно в теории миграции выделяют два типа моделей — модели макроуровня и микроуровня. Модели макроуровня отражают закономерности миграционного движения всего населения или крупных агрегированных социально-демографических групп населения (например, пожилого населения, молодых семейных пар и т.д.) в рамках некоторой территориальной системы и строятся на основе данных переписей населения или текущего учета. С помощью моделей данного класса делаются прогнозы показателей миграционных процессов (например, прогноз масштабов миграции населения из одного района в другой) и анализируют возможные сценарии развития миграционных процессов. Модели микроуровня рассматривают миграционное поведение отдельного индивида (семьи, домохозяйства). Очевидно, что при этом имеется в виду не определенный конкретный индивид, отобранный каким-либо способом из рассматриваемой совокупности, а репрезентативный индивид, подчиненный общим закономерностям миграционного поведения, характерного для рассматриваемой социальной группы или территории. Данные модели важны для понимания социальных и психологических аспектов миграции, и с их помощью осуществляется анализ процессов принятия индивидами решения о факте и выборе направления миграции.

Остановимся подробнее на некоторых динамических миграционных моделях макроуровня, которые используются для прогнозирования миграционных процессов.

Интеракционные модели, или модели пространственного взаимодействия, исторически появились первыми в теории миграции. В основе их лежит эмпирически установленный Е. Равенштейном «миграционный закон гравитации», согласно которому большинство мигрантов перемещаются лишь на короткие расстояния, а миграционные потоки тяготеют к крупным городам.

В самом общем виде модели этого вида можно представить уравнением

$$M_{ij} = k \frac{f(R_i, A_j)}{\varphi(D_{ij})}, \quad (9.23)$$

где M_{ij} — параметр взаимодействия (число мигрантов в единицу времени из территории i в территорию j); $f(R_i, A_j)$ — функция от факторов R_i (параметр, характеризующий факторы «выталкивания» из области i) и A_j (параметр, характеризующий факторы «притяжения» в область j); $\varphi(D_{ij})$ — функция расстояния D_{ij} между территориями i и j ; k — коэффициент пропорциональности. Обычно полагают, что $f(R_i, A_j) = R_i A_j$, а $R_i = P_i$, $A_j = P_j$ где P_i и P_j — численности населения территорий i и j . Таким образом, соотношение (9.23) можно переписать в виде

$$M_{ij} = k \frac{P_i P_j}{f(D_{ij})}. \quad (9.24)$$

Если рассматривается территориальная система, состоящая из n элементов, то суммарный миграционный поток из i будет равен $M_i = \sum_{j=1}^n M_{ij}$, а суммарный миграционный поток в j соответственно равен $M_j = \sum_{i=1}^n M_{ij}$.

Одной из основных проблем, связанных с использованием интеракционных моделей миграции, является необходимость достаточно большого уровня агрегации населения. Так, например, построенная модель может хорошо отражать миграционные закономерности для региона в целом, тогда как для отдельных его районов адекватную интеракционную модель построить нельзя. Важным условием построения интеракционной модели является

соизмеримость взаимодействующих территориальных единиц. В зависимости от особенностей моделирования взаимодействия территориальной системы среди интеракционных моделей выделяют гравитационные модели, модели «промежуточных возможностей» и модели, базирующиеся на теории пространственной мобильности Алонсо.

Наиболее многочисленными среди интеракционных моделей являются так называемые гравитационные модели миграции. Эти модели рассматривают территориальную мобильность населения по аналогии с законом тяготения Ньютона как взаимодействие двух пространственно разнесенных элементов (территорий). Одна из наиболее широко используемых разновидностей гравитационных моделей была предложена в начале 1940-х гг. американским социологом Джорджем Ципфом (Zipf, 1946):

$$M_{ij} = k \frac{P_i P_j}{D_{ij}}. \quad (9.25)$$

С помощью этой модели, анализируя межгородские миграции в США в 1930-е гг., Ципф показал, что предложенная модель применима для анализа различных видов перемещений индивидов между населенными пунктами (Zipf, 1946).

Позднее данная модель была усложнена путем введения поправочных коэффициентов («специфические индексы») при показателях численностей населения взаимодействующих регионов (Dodd, 1950). В качестве весов, которых может быть несколько, могут выступать такие показатели, как соотношение женского и мужского населения, уровень доходов на душу населения, доля населения в трудоспособном возрасте, образовательный уровень населения, конфессиональная структура населения и др. В этом случае обобщенная гравитационная модель (9.25) принимает вид

$$M_{ij} = k \frac{(\sum I_n) P_i^\beta (\sum J_m) P_j^\gamma}{D_{ij}^\alpha}, \quad (9.26)$$

где α , β , γ — показатели степени при численностях населения регионов i и j , $\sum I_n$ и $\sum J_m$ — обобщающие весовые коэффициенты при численностях населения регионов i и j .

Достоинствами моделей данного вида являются прежде всего относительная простота их построения и доступность стати-

стической информации практически для любого уровня анализа (межстрановая, межрегиональная, межрайонные миграции и т.д.). Основной недостаток — предположение о симметричности миграционных потоков ($M_{ij} = M_{ji}$), которая практически никогда не наблюдается в реальности. Неоднозначной представляется также определение показателя «расстояние». Используемое в гравитационных моделях физическое расстояние, измеряемое в единицах длины или времени (если учитывать время, затрачиваемое на перемещение как меру расстояния), может восприниматься разными мигрантами по-разному. Это яркий пример нелинейности человеческого мышления. Так, Г. Олссон, анализируя внутреннюю миграцию в Швеции, отметил, что мигранты из разных регионов страны по-разному воспринимают физическое расстояние. По его оценке, расстояние в 300 км для жителя обширной, но слабо заселенной северной части страны, соответствует примерно 100 км в восприятии жителя южной Швеции (Ягельский, 1980). Таким образом, представляется целесообразным использовать модифицированную меру расстояния между регионами.

С учетом всего этого были предложены более сложные модели, которые учитывают, что между пространственной мобильностью и физическим расстоянием не существует прямой зависимости. Наиболее известная среди таких моделей — модель Самуэля Стоуффера, получившая название модель «промежуточных возможностей». В основу данной модели положено понятие промежуточных возможностей, так что «число мигрирующих на данное расстояние прямо пропорционально числу возможностей, заключенных в данном расстоянии, и обратно пропорционально числу промежуточных возможностей» (Stouffer, 1940). Понятие промежуточной возможности определяется для каждого конкретного случая: ею могут быть свободный жилой фонд, свободные рабочие места, места покупок и т.д. в различных зонах города, отдаленных от центра города, и др. Так, к примеру, если рассматривать под возможностями свободный жилой фонд, то для мигранта из района в район все свободные квартиры, которые он мог занять в других местах на пути к району и непосредственно в районе, называются промежуточными возможностями. По мере увеличения расстояния переезда увеличивается «альтернативная стоимость» перемещения на это расстояние, поскольку увеличивается число «промежуточных возможностей», доступных мигранту. Попытка исключить физическое расстояние привела к введению понятия

«социальное расстояние», измеряемое социальными и экономическими показателями.

Модифицированную модель промежуточных возможностей можно представить в виде

$$M_{ij} = k \frac{X_M^A}{X_B^B X_C^C}, \quad (9.27)$$

где X_M — показатель «масштаба», определяемый как сумма общего количества въехавших за рассматриваемый период в регион j и выехавших из региона i ; X_B — количество «промежуточных возможностей»; X_C — количество «соперничающих мигрантов»; A, B, C — параметры модели, определяемые эмпирически. Число «соперничающих мигрантов» определялось как отношение числа мигрантов в зонах вокруг сравниваемых центров иммиграции с одинаковыми радиусами влияния, равными расстоянию между конкурирующими городами.

Эмпирическая проверка модели Стоуффера была осуществлена в 1975 г. В. Вадицким на примере миграций между штатами США (Wadycki, 1975). В результате он пришел к выводу, что «социальное расстояние», измеряемое промежуточными возможностями и соперничающими мигрантами для выявления пространственной мобильности, лучше, чем физическое расстояние. Фактор «соперничающих мигрантов» также оказывает существенное влияние на ограничение миграционных потоков. Исследование показало, что в большинстве случаев модель промежуточных возможностей лучше объясняет миграционные потоки, чем простая гравитационная модель.

В заключение обсуждения моделей миграции остановимся на одной модели микроуровня, основанной на теории пространственной диффузии. Напомним, что при моделировании миграции на микроуровне объектом изучения является миграционное поведение отдельных индивидов, семей или домохозяйств, принимающих решение по двум главным вопросам — мигрировать или нет и куда мигрировать.

Диффузионная миграционная модель была разработана шведским исследователем Торстеном Хегерстрандом (Hägerstrand, 1967). Он рассматривает миграцию как диффузионный процесс, под которым понимается процесс распространения информации и материальных объектов вокруг некоего начального источника (см. рис. 9.17).

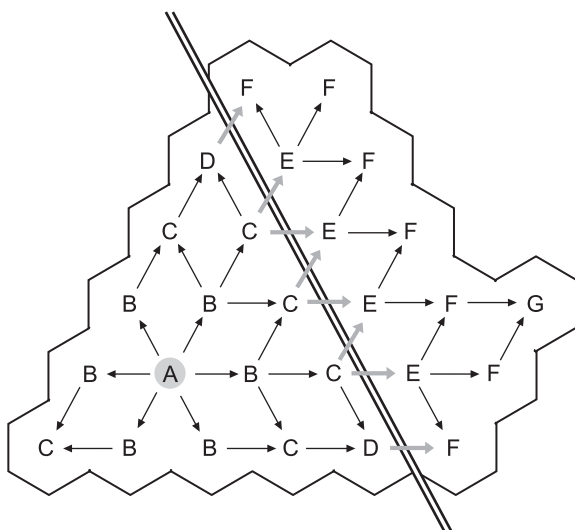


Рис. 9.17. Процесс пространственной диффузии по Т. Хегерстранду: точка А — источник информации, $\rightarrow$ — «нормальная» диффузия (распространение происходит за один период), $\parallel$ — «контактный» барьер, $\Rightarrow$ — «замедленная» диффузия (распространение происходит за два периода)
Источник: Hägerstrand, 1967.

Рассмотрим пример функционирования диффузионной модели, которая имеет определенное сходство с рассмотренной выше моделью решеточного газа. Любое перемещение может рассматриваться как результат двух последовательных случайных событий: 1) выделения из всех жителей данной территории того, кто станет мигрантом (вероятность попадания «информации»); 2) выбор направления и протяженности перемещения (каждое направление и каждое расстояние характеризуются определенной вероятностью). Обе вероятности являются функциями индивидуальных признаков, характеристики мест и т.п. и должны быть установлены априорно на основе других исследований или рабочих гипотез (к примеру, протяженность миграции движения определяется по экспоненциальной функции расстояния).

На первом этапе моделирования карта размещения населения покрывается квадратной или гексагональной сеткой на макете, который по форме соответствует исследуемой территории, причем величина клеток подбирается таким образом, чтобы центральная клетка соответствовала величине региона-источника информации. Полученная сетка представляет собой пространственное упорядочение распространения информации или контактов, т.е. каждая клетка находится в пространственном отношении с центральной, причем вероятность этого отношения соответствует распределению, описываемому некоторой функцией (к примеру, $f(x) = kD_x^{-b}$, где D — расстояние от источника информации до региона x ; k , b —

параметры модели). Эта функция показывает, что вероятность контакта симметрично уменьшается по мере удаления от источника информации (центральной клетки): крайним клеткам будет соответствовать наименьшая вероятность контакта. Сумма вероятностей, вписанных во все клетки, равняется единице. Таким образом, можно получить матрицу вероятностей непосредственных контактов источника с потенциальным мигрантом, чье место жительства совпадает с одной из клеток (см. табл. 2). Эта матрица называется средним полем информации (Mean Information Field, MIF).

Таблица 2

**Макет имитации миграции.
Матрица размещения потенциальных мигрантов**

Матрица вероятностей					Матрица случайных чисел				
0,01	0,02	0,04	0,02	0,01	1	2–3	4–7	8–9	10
0,02	0,06	0,10	0,06	0,02	11–12	13–18	19–28	29–34	35–36
0,04	0,10		0,10	0,04	37–40	41–50		51–60	61–64
0,02	0,06	0,10	0,06	0,02	65–66	67–72	73–82	83–88	89–90
0,01	0,02	0,04	0,02	0,01	91	92–93	94–97	98–99	100

Затем каждому значению вероятности в отдельных клетках пропорционально приписывают группы случайных чисел (к примеру, от 1 до 10 000), и эти группы вписываются в соответствующие клетки макета (например, клетке С1 соответствуют случайные числа 37–40). Заполненная таким образом сетка накладывается на карту размещения населения, и взяв из таблицы случайных чисел некое число, можно получить место (клетку на макете), в котором находится потенциальный мигрант.

На втором этапе моделирования определяется направление и длина пути мигранта. Если используемое на первом этапе распределение вероятностей контактов принять как определяющее направления и протяженность территориального перемещения, то мы можем использовать ту же сетку для определения расстояния миграции. В противном случае следует построить новую сетку с новыми распределениями случайных чисел. Этот новый макет центрируется по полученному случайным путем полю (т.е. по идентифицированному мигранту). Взяв затем из таблицы слу-

чайных чисел какое-либо случайное число (группу цифр), находим нужную клетку, в которую должен направиться мигрант (см. табл. 3). Может случиться так, что будет выбрано случайное число, соответствующее клетке, в которой живет потенциальный мигрант. Это можно рассматривать в качестве изменения места жительства в рамках населенного пункта или миграции на небольшое расстояние.

Таблица 3

Макет имитации миграции. Выбор пути миграции

0,022	0,028	0,032	0,028	0,022	000–021	022–049	050–081	082–109	110–131
0,028	0,045	0,063	0,045	0,028	132–159	160–204	205–267	268–312	313–340
0,032	0,063	0,127	0,063	0,032	341–372	373–435	436–563	564–626	627–658
0,028	0,045	0,063	0,045	0,028	659–686	687–731	732–794	795–839	840–867
0,022	0,028	0,032	0,28	0,022	868–889	890–917	918–949	950–977	978–999

Существенным недостатком диффузионных моделей является то, что исследование реальных миграционных процессов с их помощью связано с большими техническими трудностями, поэтому известные примеры относятся лишь к малым популяциям и относительно небольшим территориям. Модели этого типа также непригодны для прогнозирования миграционных потоков. Вместе с тем они позволяют проанализировать качественные последствия и наиболее предпочтительные для индивидуумов направления миграции (Ягельский, 1980).

Построение и использование сложных нелинейных динамических моделей для описания и прогнозирования глобальных миграционных процессов только начинается. Большинство из разработанных к настоящему моменту моделей миграции направлено на описание лишь отдельных его форм и аспектов, имеют локальный характер и ограниченную сферу применения. Многие из построенных моделей применимы лишь для конкретной территории (к примеру, внутрирегиональная миграция в США), и они не могут быть автоматически применены для анализа миграционных процессов в другой территориальной системе или для описания глобальных процессов миграции. Следует также отметить, что моделирование миграционных процессов опирается на весьма слабую информационную базу, которая не позволяет в полной мере апробировать многие из теоретически разработанных моде-

лей или же вынуждает при моделировании сознательно и с ущербом для качества моделей упрощать их с тем, чтобы применять на практике. Таким образом, построение эффективных моделей глобальной миграции представляется в настоящее время важной задачей, и, без сомнения, активное привлечение к решению данной проблемы междисциплинарных методов и подходов позволит выйти здесь на новый качественный уровень.

Литература к главе 9

- Алешковский И.А., Иванов А.В., Ильин И.В. и др. Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010.
- Анфиногентов В.Г., Короновский А.А., Храмов А.Е. Некоторые модели класса решеточных газов, связанные с описанием численности популяций // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2000. № 8.
- Безручко Б.П., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Введение в синергетику. Экскурс в десяти лекциях. М.: Комкнига, 2010.
- Борисов В.А. Демография. 4-е изд. М.: Nota bene, 2004.
- Катица С.П. Сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. Очерк теории роста человечества. М., 1999.
- Катица С.П. Парадоксы роста: Законы развития человечества. М.: Альпина Нон-фикшн, 2010.
- Катица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. М.: УРСС, 2003.
- Катица С.П. Феноменологическая теория роста населения Земли // УФН. 1996. № 166.
- Короновский А.А., Трубецков Д.И. Нелинейная динамика в действии. Саратов, 2003.
- Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Динамика численности населения как процесс, подчиняющийся уравнению диффузии // Доклады Академии наук. 2000. № 372.
- Кортаев А.В., Малков А.С., Халтурина Д.А. Компактная математическая макро-модель технико-экономического и демографического развития Мир-система (1-1973 г.). История и синергетика. Математическое моделирование социальной динамики. М.: УРСС, 2005.
- Кортаев А.В., Малков А.С., Халтурина Д.А. Законы истории. Математическое моделирование развития Мир-системы. Демография, экономика, культура. 2-е изд. М.: УРСС, 2007.
- Кортаев А. В., Халтурина Д.А., Божевольнов Ю.В. Законы истории. Вековые циклы и тысячелетние тренды. Демография, экономика, войны. 3-е изд. М., 2010.
- Лопатников Д.И., Храмов А.Е., Короновский А.А. Некоторые аспекты изменения численности народонаселения США с точки зрения нелинейной динамики // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2002. № 10.
- Николис Г., Пригожин И.Р. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1984.
- Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. 3-е изд. М.; Ижевск, 2001.

- Смит Дж.М. Модели в экологии. М.: Мир, 1976.
- Трубевцов Д.И. Колмогоров, Петровский, Пискунов, Фишер и нелинейное уравнение диффузии // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1997. № 5.
- Уильямсон М. Анализ биологических популяций. М.: Мир, 1975.
- Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985.
- Ягельский А. География населения / Под ред. Ю.Л. Пивоварова. М.: Прогресс, 1980.
- Cambridge Encyclopedia. The Cambridge Encyclopedia of Human Evolution. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004.
- Dodd S. The Interaction Hypothesis: A Gravity Model Fitting Physical Masses and Human Groups // American Sociological Review. 1950. N 15.
- Foerster von et al. Doomsday: Friday, 13, November, A.D. 2026 // Science. 1960. N 132.
- Grubler A. Urbanization as Core Process of Global Change: The Last 100 Years and Next 100. Proc. Of Int. Seminar «Globalization as Evolutionary Process: Modeling, Simulating and Forecasting Global Change» Int. Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Austria, 2006. April 6–8.
- Haub C., Yanagisita M. Population Reference Bureau. Washington D.C., 1985.
- Hägerstrand T. Innovation Diffusion as a Spatial Process. Chicago. University of Chicago Press, 1967.
- Horner S.J. von. Population exposition and interstellar expansion // J. British Interplanet. Soc. 1975. Vol. 28.
- Huang K. Statistical Mechanics. N.Y., 1963.
- Modelski G. World cites: -3000 to 3000. Washington: Faros 2000, 2003.
- Lee E. A Theory of Migration // Demography. 1966. N 3.
- Levinson D., Malone M. Toward Explaining Human Culture. New Haven. CT: HRAF Press, 1980.
- Naroll R., Divale W.T. Natural Selection in Cultural Evolution: Warfare versus Peaceful Diffusion // American Ethnologist. 1976. N 3.
- Ravenstein E.G. The Laws of Migration // Journal of the Statistical Society of London. 1885. N 48.
- Stouffer S.A. Intervening Opportunities: A Theory Relating Mobility and Distance // American Sociological Review. 1940. N 5.
- UN population division, 2010. United Nations. Department of Economics and Social Affairs. Population Division (<http://www.un.org/esa/population>).
- Wadycki W.J. Stouffer's Model of Migration: A Comparison of Interstate and Metropolitan Flows // Demography. 1975. N 12.
- Zipf G. The P1P2 / D hypothesis: On the Intercity Movement of Persons // American Sociological Review. 1946. N 11.



МИРОВОЕ СООБЩЕСТВО И ГЛОБАЛЬНАЯ ЭКОНОМИКА КАК НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

10.1. Сетевые модели и их применение

Глобальные процессы в современном мире с неизбежностью ведут к установлению глобальных связей между отдельными элементами (подсистемами), что означает формирование и развитие различных сетевых структур. Сети окружают нас, да и мы сами как индивидуумы также являемся объектами социальных и социально-экономических сетей. С одной стороны, сети могут быть наблюдаемыми материальными объектами окружающего нас мира, такими как электрические сети, Интернет, железнодорожные или автодорожные сети. С другой стороны, сети могут быть определены и в абстрактном пространстве, как, например, сеть авиационных сообщений, когда между элементами сети (в данном случае между аэропортами) не существует материальных связей, таких как железнодорожные пути или электрические провода. Часто говорят и о социальных сетях, в которых элементами сети выступают индивиды, а различные связи между индивидуумами (дружеские, родственные, рабочие и т.д.) трактуются как связи между элементами сети.

Изначально теория сетей возникла как область дискретной математики — так называемая теория графов. Впоследствии интерес к сетям возрос в связи с анализом различных техногенных сетей, сетей управления и т.д., позже интерес переместился к анализу социальных сетей, в которых основное внимание сосредоточивалось на взаимосвязях между отдельными индивидуумами, входящими в социальные группы.

В последние годы огромный интерес вызывают сложные сети, такие, структура (топология) которых нерегулярна и может изменяться во времени. Именно такими сетевыми структурами связаны глобальные процессы. По большому счету, можно утверждать, что сложные сети являются неотъемлемой составляющей глобальных процессов, и используя соответствующий аппарат, можно изучать, характеризовать и моделировать различные глобальные процессы.

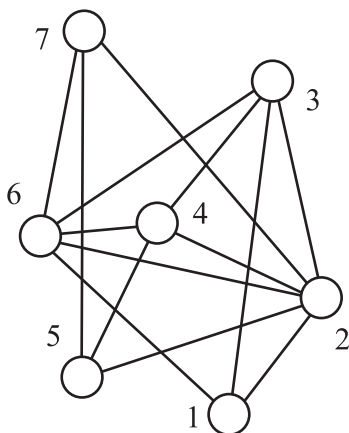


Рис. 10.1. Пример ненаправленной сети

Остановимся кратко на основных понятиях теории сетей (Voscaletti et al., 2006). Формально сеть может быть представлена как множество (набор) элементов, называемых узлами сети, и связей между ними. В простейшем случае связи являются ненаправленными, они характеризуют только сам факт, независимо от того, связаны два элемента сети друг с другом или нет. Пример такой ненаправленной сети представлен на рис. 10.1, где узлы показаны кругами, а связи между ними — прямыми линиями. Каждый узел такой сети характеризуется

своим номером. Два узла, связанные друг с другом, называются соседними (или смежными). Так, на рис. 10.1 узлы 1 и 3 являются соседними, а 1 и 2 — нет.

Примером ненаправленной сети может выступать сеть метрополитена, в которой узлами являются станции, а связями — линии метро. Если две станции соединены туннелем, по которому перемещаются электропоезда, то на схеме сети это будет отражено линией.

Подобный подход может быть применен и для более глобальных сетей, например для сети железнодорожных сообщений (рис. 10.2). Очевидно, однако, что подобное описание сети железнодорожных дорог хотя и дает некоторое представление о том, как «устроена» рассматриваемая сеть, в целом ряде случаев оказывается недостаточным. В частности, по каким-то железнодорожным веткам может происходить интенсивное движение железнодорожных составов, другие же ветки могут быть слабозагруженными. В этом случае на помощь приходят так называемые взвешенные сети, в которых каждой связи между узлами с номерами i и j присваивается некоторое значение w_{ij} — «вес», называемое также силой связи (см. рис. 10.3). Применительно к железным дорогам грузооборот, приходящийся на каждую железнодорожную ветку, является весом соответствующей связи.

Города, интенсивно растущие с течением времени, представляют собой сложные объекты, которые также следует рассма-



Рис. 10.2. Схематическая карта железнодорожных путей России 1890 г.
(http://www.aroundspb.ru/maps/rroads/1890_russia.jpg)

тривать как сети, в том числе и взвешенные. Рисунок 10.4 иллюстрирует сеть дорог города Минска (Генеральный план Минска 2010, Архитектура и строительство № 4 (215) 2010, <http://ais.by/journal/11498>). Из рисунка отчетливо видно, что все дороги, в зависимости от транспортного потока, имеют, в терминах Генерального плана, разное «значение»: дороги подразделяются на дороги непрерывного движения, общегородского, районного и местного значения. С точки зрения теории сетей это означает, что связи (дороги), соединяющие различные узлы сети (в данном случае, перекрестки), имеют разный вес. Вес связей на рис. 10.4

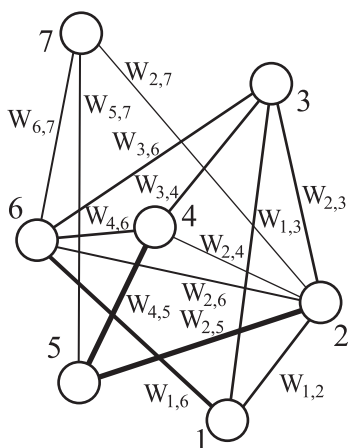


Рис. 10.3. Пример взвешенной сети. Величины w_{ij} , приведенные около каждой связи, характеризуют ее вес, который также графически визуализирован с помощью толщины линий, изображающих связи

показан толщиной соответствующих линий.

Наконец, следует описать еще направленные сети. В нескольких рассмотренных выше примерах при описании сетей учитывалось, существует связь между двумя определенными узлами или нет, при этом оба узла являются рав-

ноправными. Однако часто оказывается, что важное значение имеет направленность связи. Например, такая ситуация складывается при описании мировой экономики: каждая страна представляет собой узел в мировой экономической сети, связями в которой выступают хозяйственные отношения. При этом если одна страна экспортирует какой-либо товар в другую страну, то

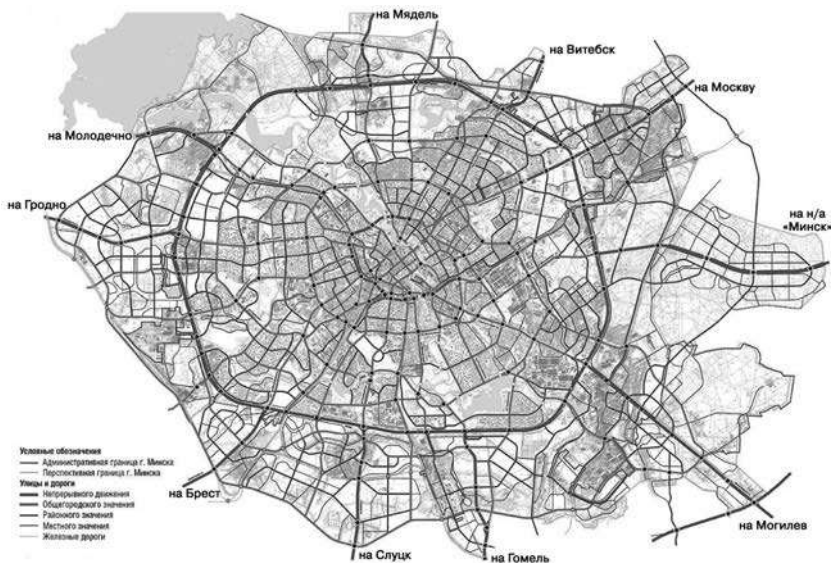


Рис. 10.4. Сеть дорог города Минска: дороги непрерывного движения, общегородского, районного и местного значения

эти две страны (два узла) оказываются связанными друг с другом, но в этой связи они неравноправны. Поэтому в подобных случаях у каждой связи есть направление, и такие сети получили название направленных. В рассматриваемом случае направление связи будет задаваться от страны, экспортирующей товар, к стране, этот товар импортирующей. Пример направленной сети приведен на рис. 10.5, где стрелками отмечено направление связи (например, узел 1 действует на узлы 2, 3 и 6 без обратного влияния на него).

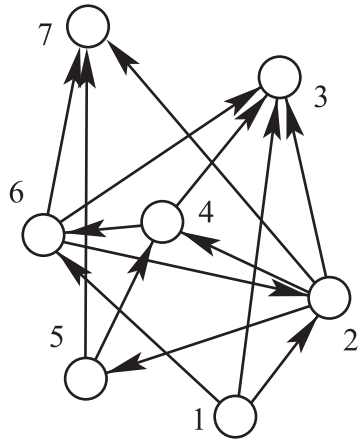


Рис. 10.5. Пример направленной сети

10.2. Величины, характеризующие сети

Для того чтобы охарактеризовать такой сложный объект, как сеть, используется достаточно много характеристик. Весьма удобно описывать сеть с помощью матрицы смежности (adjacency matrix), которая является квадратной матрицей размерности $N \times N$ (где N — общее количество элементов рассматриваемой сети), каждый элемент которой a_{ij} равен единице, если существует связь между i -ым и j -ым узлами сети, и нулю, если такой связи нет. По главной диагонали матрицы смежности находятся нули, что подразумевает, что связь узла с самим собой не рассматривается.

Важной величиной, характеризующей каждый отдельный узел сети, является его степень (или связность). Степень узла k_i определяется как число связей, которыми рассматриваемый узел связан с другими узлами

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij}.$$

Для направленных сетей выделяют число входящих и число исходящих связей, при этом степень узла вычисляется как сумма входящих и исходящих связей.

Рисунок 10.6 иллюстрирует понятие степени узла на примере сети Интернет. В качестве узлов выступают города Земли. Чем

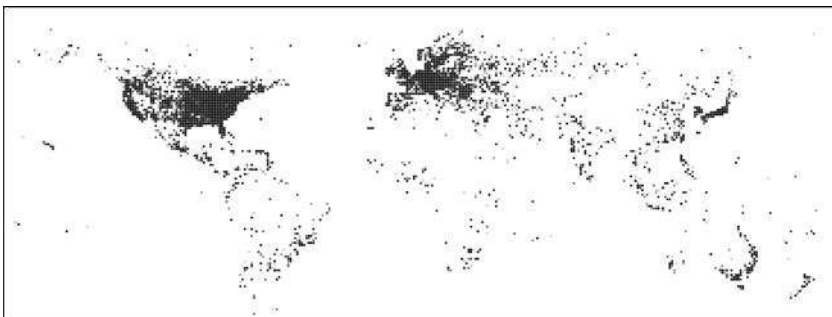


Рис. 10.6. Города, выступающие в качестве узлов сети Интернет. Узлы с большей степенью (с большим количеством связей) показаны более темным цветом. Рисунок любезно предоставлен Крисом Харрисоном (Chris Harrison, Carnegie Mellon University) специально для данной книги

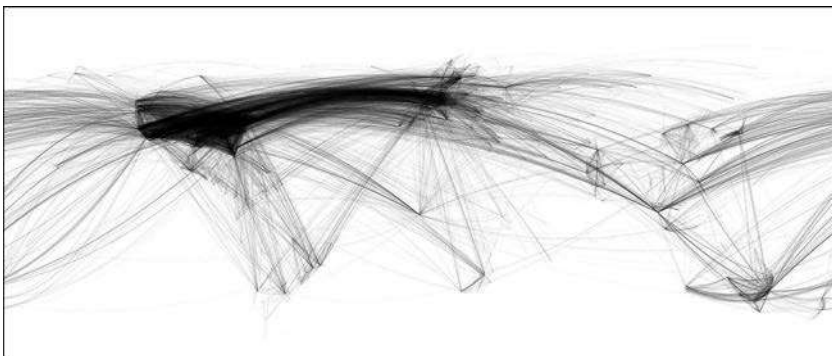


Рис. 10.7. Топология связей в сети Интернет. В качестве узлов сети выступают города. Рисунок любезно предоставлен Крисом Харрисоном (Chris Harrison, Carnegie Mellon University) специально для данной книги

больше связей связывает этот узел с другими, т.е. чем больше степень узла, тем более темным цветом показан соответствующий узел. Рисунок 10.7 в свою очередь показывает топологию связей между этими узлами. Интенсивность темного цвета узла соответствует количеству связей (степени узла).

Весьма важной топологической характеристикой сети является распределение степеней узлов $P(k)$, которая определяется как вероятность того, что произвольно выбранный узел сети будет характеризоваться степенью k , т.е. будет иметь k связей. В случае направленных сетей рассматриваются два распределения: для входящих и исходящих связей соответственно. Распределение степеней узлов полностью определяет статистические свойства *некорре-*

лированных сетей. В то же самое время, в окружающем нас мире большое число сетей являются коррелированными в том смысле, что вероятность того, что узел степени k оказывается связанным с другим узлом степени k' , зависит от степени k самого узла. Для таких сетей распределения степеней узлов оказывается недостаточным и необходимо ввести условную вероятность $P(k'|k)$, которая определяется как вероятность того, что связь от узла со степенью k ведет к узлу со степенью k' . Условная вероятность $P(k'|k)$ должна удовлетворять условию нормировки

$$\sum_{k'} P(k'|k) = 1$$

и условию степенного баланса

$$kP(k'|k)P(k) = k'P(k|k')P(k').$$

Для некоррелированных сетей условная вероятность $P(k'|k)$ не зависит от степени узла k , а условие степенного баланса имеет вид

$$P(k'|k) = \frac{k'P(k')}{\langle k \rangle},$$

где $\langle k \rangle$ — средняя степень узла сети, вычисляемая как

$$\langle k \rangle = \sum_k kP(k).$$

Важно отметить, что при изучении реальных (а не абстрактных) сетей прямой расчет условных вероятностей $P(k'|k)$ дает очень «зашумленные» результаты в силу конечного размера N анализируемых сетей, поэтому в рассмотрение вводится такая характеристика, как средняя степень соседних узлов для узла с номером i

$$k_{m,i} = \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} k_j,$$

где в сумме учитываются только узлы, являющиеся ближайшими соседями рассматриваемого i -ого узла. На основе этой характеристики может быть рассчитана средняя степень соседних узлов для узла со степенью k (обозначаемая как $k_m(k)$), которая связана с условной вероятностью как

$$k_{nn}(k) = \sum_{k'} k' P(k'|k).$$

Для некоррелированных сетей средняя степень соседних узлов для узла со степенью k не зависит от величины k и имеет вид

$$k_{nn}(k) = \frac{\langle k^2 \rangle}{\langle k \rangle}, \quad \text{где } \langle k^2 \rangle = \sum_k k^2 P(k).$$

Для коррелированных сетей средняя степень соседних узлов для узла со степенью k характеризуется явно выраженной зависимостью от k . По характеру этой зависимости коррелированные сети подразделяются на ассортативные и дисассортативные. В ассортативных сетях, где $k_{nn}(k)$ возрастает с увеличением k , узлы сети имеют тенденцию быть связанными с равными себе по степени узлами, в то время как для дисассортативных сетей, характеризующихся уменьшением величины $k_{nn}(k)$ с ростом k , узлы с малыми степенями с большой долей вероятностей оказываются связанными с узлами с большими степенями. Примеры ассортативных и дисассортативных сетей весьма часто встречаются в окружающей нас действительности. В частности, установлено, что глобальная информационная сеть Интернет — это некоррелированная сеть (Echenique et al., 2005).

Интернет является очень интересным объектом для изучения, поскольку в силу большого размера он позволяет осуществить заслуживающий доверия статистический анализ данных, в том числе и топологических свойств сети. Следует сказать, что сеть Интернет выступает самоорганизующейся сущностью, развитие которой определяется различными локальными правилами, такими как законодательные акты отдельных государств, информационными потребностями, экономическими возможностями, технологическим уровнем развития и т.п., без централизованного управления. Но несмотря на существование большого количества разнообразных локальных правил, по которым функционирует и развивается Интернет, в его структуре прослеживаются общие закономерности. Не следует сбрасывать со счетов и колоссальную роль глобальной информационной сети для человеческого общества, поскольку общество испытывает возрастающие потребности в подобных информационных сетях и все больше от них зависит. Нельзя не признать, что глобальные информационные системы, к которым, безусловно, относится сеть Интернет, оказывают все

большее воздействие на развитие как всего человечества, так и отдельных государств.

Необходимость осуществлять оперативный обмен и управление информацией стало насущной потребностью для человечества, и роль глобальной информационной сети в современных условиях неоспорима. Для эффективной работы сети Интернет были разработаны различные протоколы передачи информации. Но важно осознавать, что и человеческое общество, и сеть Интернет не являются стационарными, они динамически развиваются. Масштабируемость протоколов передачи данных, их надежность для больших систем (и больших нагрузок) являются критически важными задачами для того, чтобы гарантировать бесперебойную работу глобальной информационной сети. В силу этой насущной необходимости важную роль приобретает построение реалистичных моделей для того, чтобы разработать и протестировать новые протоколы передачи данных и топологию создаваемых сетевых соединений. Очевидно, что изучение законов функционирования сложных сетевых объектов является ключевой задачей для понимания того, в каком направлении следует проводить работы и по разработке новых протоколов, и по их оптимизации, и по созданию современной инфраструктуры.

Важно отметить, что глобальная информационная сеть может анализироваться на различных уровнях. Как правило, Интернет рассматривается на двух различных уровнях: на уровне автономной системы и на уровне роутеров. Интернет формируется из множества доменов, находящихся под управлением (контролем) различных организаций, провайдеров и т.п. Если узлами сети считать отдельные домены, то подобное рассмотрение называется рассмотрением на уровне автономных систем. Каждая из таких автономных систем состоит из подсетей и содержит устройства (роутеры), которые осуществляют пересылку и перенаправление пакетов данных как внутри одной автономной системы, так и между различными подсистемами. Выбор в качестве узлов сети устройств, осуществляющих передачу и перенаправление пакетов данных, означает рассмотрение на уровне роутеров.

Основные различия в описании сети Интернет на этих двух уровнях обусловлены ограничениями, связанными с протоколами передачи данных, поскольку для передачи данных внутри автономной системы и между различными системами используются различные протоколы. Именно это обуславливает топологическое

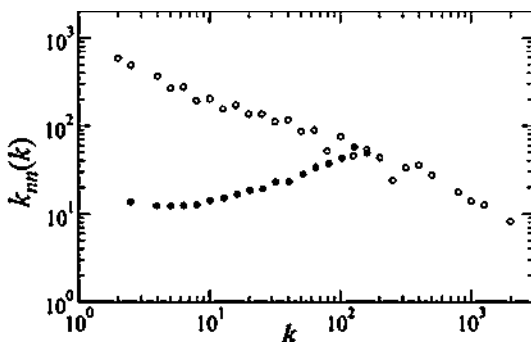


Рис. 10.8. Зависимость средней степени соседних узлов $k_{mn}(k)$ от степени k для глобальной информационной сети Интернет при рассмотрении на уровне автономных систем (символ $\circ$) и на уровне роутеров (символ $\bullet$)

автономных систем и на уровне роутеров. В частности, это проявляется и в корреляции узлов с учетом их степеней.

На рис. 10.8 приведена зависимость величины $k_{mn}(k)$ от степени отдельного узла k для вышеописанных уровней. Видно, что при рассмотрении на уровне автономных систем глобальная информационная сеть является дисассортативной, т.е. автономные системы с малыми степенями (связанные с малым количеством других автономных систем) с большой долей вероятностей оказываются связанными с автономными системами с большими степенями (с большим количеством связей). В противоположность этому на уровне рассмотрения отдельных роутеров глобальная сеть демонстрирует ассортативный характер — узлы сети имеют тенденцию быть связанными с другими узлами, имеющими такую же степень.

Центральным моментом в теории сетей является достижимость одного из узлов сети (скажем, узла j) из другого узла (i). Для того чтобы охарактеризовать эту особенность, используется целый ряд величин, такие как *блуждание*, *след*, *путь*, *цикл*. Блуждание из узла i в узел j представляет собой чередующуюся последовательность узлов и связей (последовательность соседних узлов), которая начинается в узле i и заканчивается в узле j . Длина блуждания определяется как число связей в этой последовательности. След — это блуждание, в котором не повторяется ни одна связь, а путь — это блуждание, в котором ни один из узлов не посещается более одного раза. Соответственно блуждание минимальной длины между двумя узлами называется *кратчайшим путем*. Обратите внимание, что кратчайших путей, соединяющих два узла i и j , может быть несколько. Замкнутое блуждание, содержащее в себе по меньшей мере три узла, из которых ни один не повторяется, называется ци-

различие между представлением сети Интернет на уровне

клон. Если для любой пары узлов сети существует соединяющий их путь, то такая сеть называется *связанной*, в противном случае говорят о *несвязанной* сети. Схематическое изображение несвязанной сети приведено на рис. 10.9 — эта сеть является несвязанной, поскольку нет пути, например, из узла 1 в узел 2.

Важную роль для процессов транспорта вещества или передачи информации в сетях играют *кратчайший путь*, *диаметр* и *промежуточность*. Когда возникает необходимость, например, передать пакет информации с одного компьютера на другой, кратчайший путь обеспечивает оптимальное решение данной задачи, поскольку позволяет сэкономить вычислительные ресурсы, и время. Именно по этой причине кратчайший путь является важной величиной для характеристики внутренней структуры сети.

Очень часто оказывается полезно представить кратчайший путь рассматриваемой сети как матрицу D , в которой каждый элемент d_{ij} представляет собой кратчайший путь из узла i в узел j . Максимальное значение элементов этой матрицы называется *диаметром* сети. Мерой типичного (характерного) расстояния между двумя узлами сети является *среднее значение кратчайшего пути* (называемое также *характерной длиной пути*), определяемое как средняя величина всех кратчайших путей, вычисленная по всем возможным парам узлов сети

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j, i \neq j} d_{ij}.$$

Однако характерная длина пути оказывается неудобной для несвязанных сетей, поскольку в этом случае часть элементов матрицы D приходится считать бесконечными (так, например, для несвязанной сети, приведенной на рис. 10.9, $d_{12} = \infty$), и, как следствие, значение L также оказывается бесконечным. Для того чтобы избежать этого, в рассмотрение вводят такую характеристику сети, как *эффективность*

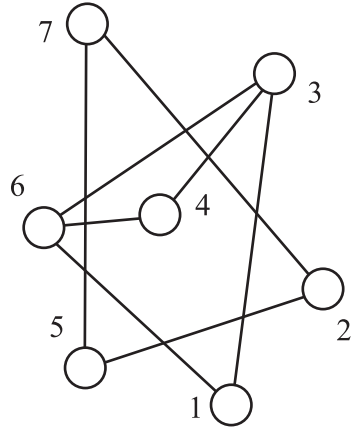


Рис. 10.9. Пример несвязанной сети

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j,i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}.$$

Очевидно, что чем меньше кратчайший путь между узлами i и j сети, тем более эффективными оказываются возможности коммуникации между этими узлами, что находит свое отражение в росте величины $1/d_{ij}$. Важно отметить, что при этом узлы, у которых нет соединяющего их пути, вносят нулевой вклад в эффективность сети, позволяя избежать проблемы с обращением рассматриваемой величины в бесконечность.

Если два узла j и k не являются соседними, то коммуникационные возможности между ними сильно зависят от узлов, принадлежащих пути, соединяющему рассматриваемые узлы. Поэтому мера важности каждого узла может быть определена с помощью подсчета количества кратчайших путей, проходящих через этот узел. Подобная характеристика, называемая *промежуточностью*, определяется как

$$b_i = \sum_{j,k,k \neq j} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}},$$

где n_{jk} — количество кратчайших путей, соединяющих узлы j и k , а $n_{jk}(i)$ — количество кратчайших путей, соединяющих узлы j и k и при этом проходящих через узел i . Иными словами, под знаком суммы стоит доля всех кратчайших путей между узлами j и k , которые проходят через рассматриваемый узел i , а промежуточность определяется как сумма этих долей по всем узлам. Таким образом, «важность» узла в сети может определяться не только тем, какое количество у него связей с другими узлами (степень узла), но и тем, насколько «удобно» он расположен в сети.

Важность узла для сети характеризуется понятием *центральности*, которая, в зависимости от рассматриваемой задачи, может вводиться в рассмотрение по-разному; промежуточность узла (наряду со степенью) является одним из стандартных способов определения центральности. Еще одним способом определить центральность узла является понятие *близости*, которое вводится в рассмотрение как величина, обратная к среднему расстоянию до всех остальных узлов.

Понятие промежуточности, изначально введенное в рассмотрение для узлов, может быть распространено и на связи сети. В этом случае под промежуточностью связи понимается количество

кратчайших путей между всевозможными парами узлов, которые (кратчайшие пути) проходят через рассматриваемую связь.

В случае взвешенных сетей, когда связь между узлами i и j имеет свой собственный вес w_{ij} , в рассмотрение вводят также такую характеристику узлов, как их *мощность*. Все дело в том, что индивидуальные значения весов для отдельных связей не дают общего представления о всей сети в целом, тогда как в терминах мощности узлов удастся получить более целостную картину. Для узла i его мощность вводится как

$$s_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} w_{ij},$$

определяя мощность узла как полный вес всех его связей. Мировая экономика, например, может рассматриваться как взвешенная сеть. На рис. 10.10 представлено изображение модели финансовой системы 2005 года (Мэтьюз, 2011). Размер узла сети пропорционален объему внешних финансовых потоков, толщина связи характеризует объем двусторонних финансовых потоков. Иными словами, объем финансовых потоков выступает в качестве веса связей, при этом характер направленности связи не учитывается. При определении же мощности узла здесь во внимание принимаются только входящие связи, что нетипично и сделано в качестве иллюстрации.

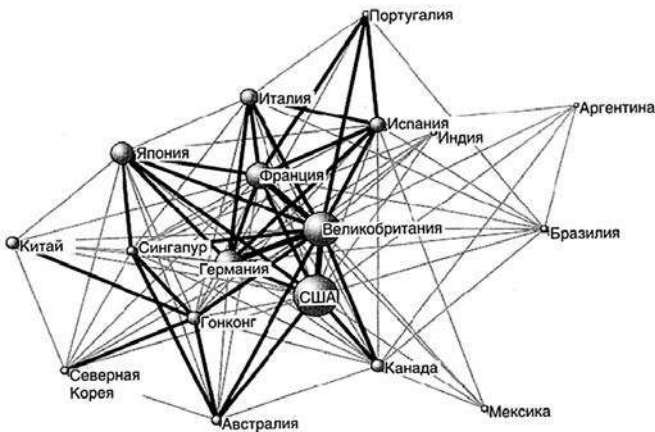


Рис. 10.10. Представление мировой экономики с позиций взвешенной сети

Свойства взвешенных сетей хорошо видны и на примере сети международной ассоциации воздушного транспорта, рассмотрению которой посвящен следующий раздел.

10.3. Пример взвешенной сети — сеть международной ассоциации воздушного транспорта

Сеть международной ассоциации воздушного транспорта, изученная в работе (Barrat, 2004), является примером такой взвешенной сети. Исходная база данных, по которой проводился анализ, представляла собой список международных аэропортов, попарно соединенных между собой прямыми рейсами и числом перевозимых пассажиров этими прямыми рейсами. Иными словами, узлами сети выступали международные аэропорты, связями — прямые (беспересадочные) рейсы, а число перевозимых пассажиров (в миллионах пассажиров в год) являлось весом той или иной связи (см. рис. 10.11). На момент проведения исследований сеть состояла из $N = 3880$ узлов и $E = 18\,810$ связей (в соответствии с числом существовавших прямых рейсов). Средняя степень узла составляла

$$\langle k \rangle = \frac{2E}{N} = 9,7,$$

тогда как максимальное значение степени узла составляло $k_{\max} = 318$.

Для сети международной ассоциации воздушного транспорта вес отдельного узла — это суммарный пассажиропоток, проходящий через аэропорт. По большому счету, вес каждого узла в такой взвешенной сети представляет собой естественную меру центральности данного узла, т.е. характеризует, насколько важную роль играет этот узел во всей структуре сети.

Идентификация наиболее важных, центральных узлов в системе является очень значимой задачей в теории сетей. Как уже отмечалось выше, степень узла также является величиной, характеризующей важность узла, причем она представляется интуитивно наиболее простой топологической характеристикой с этой точки зрения — чем с большим количеством других узлов связан рассматриваемый узел, тем более центральное положение в сети он занимает. Однако далеко не всегда «большее» означает «лучшее», и максимальное значение степени узла не всегда соответствует

самому «важному» узлу. (Кроме всего прочего, следует отметить, что понятие «важность» может иметь разный смысл в зависимости от решаемой задачи.)

Рассматривая только степени узлов, можно упустить из виду тот факт, что узлы с малой степенью могут быть ключевыми с точки зрения связи друг с другом различных регионов, играя фактически роль мостов, связывающих эти регионы. Именно поэтому в транспортных сетях часто используют понятие промежуточности, описанное выше. Тем не менее, и степень узла, и его промежуточность базируются исключительно на топологических свойствах сети. В связи с этим представляется важным использовать и альтернативные определения центральности, в частности, такие как мощность узла, — применительно к сети международной ассоциации воздушного транспорта это означает, что чем больший пассажиропоток проходит через выбранный узел (аэропорт), тем большее значение он играет в рассматриваемой сети. Следует также выяснить, как величины, характеризующие важность (центральность) элемента в сети с разных позиций, соотносятся друг с другом.

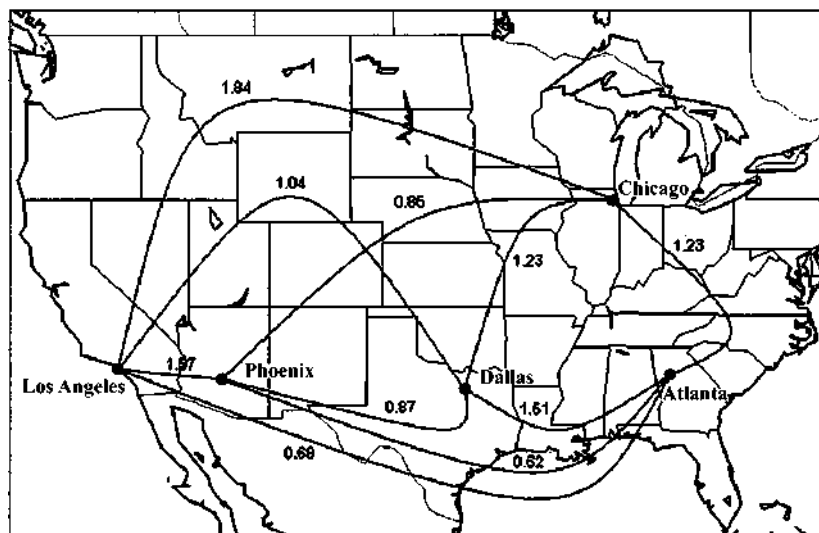


Рис. 10.11. Взвешенная сеть крупнейших аэропортов США. Крупнейшие аэропорты (узлы) соединены связями, обозначающими наличие прямых (беспересадочных) рейсов в обоих направлениях. Вес связей показан цифрами, обозначающими количество миллионов пассажиров в год

Если предположить, что связи между узлами устанавливаются случайно (говорят, что в таких случаях отсутствуют корреляции между весом связей и степенью узлов), то средняя мощность узла $s(k)$ будет связана с его степенью k как

$$s(k) = \langle w \rangle k,$$

где $\langle w \rangle = \frac{1}{2E} \sum_{i,j} a_{ij} w_{ij}$ — средний вес связи в сети. В этом случае мощность узла оказывается прямо пропорциональна его степени, т.е. в таком случае (для сети со случайными связями) обе эти величины (и мощность узла, и его степень) несут одну и ту же информацию о системе.

Однако в реальных сетях все обстоит несколько иначе. Рисунок 10.12 иллюстрирует зависимость средней мощности узла $s(k)$ от степени k , полученную для сети международной ассоциации воздушного транспорта (данные, соответствующие этой сети, показаны черными кружками). Видно, что в отличие от сети со случайно установленными связями средняя мощность узла зависит от его степени k по степенному закону $s(k) \sim k^\beta$, где показатель степени для сети международной ассоциации воздушного транспорта $\beta = 1,5 \pm 0,1$. Это означает, что мощность узлов растет быстрее, чем их степень, т.е. вес связей, принадлежащих узлу с большим числом связей (с большей степенью), имеет тенденцию к росту его значения, чем в случае сетей, где связи устанавливаются случайным образом. Это означает наличие сильной корреляции между весом связи и топологическими свойствами сети международной ассоциации воздушного транспорта, где чем крупнее аэропорт,

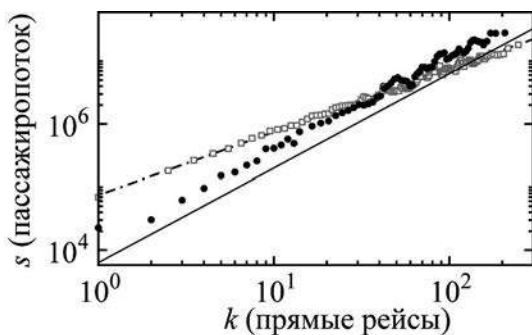
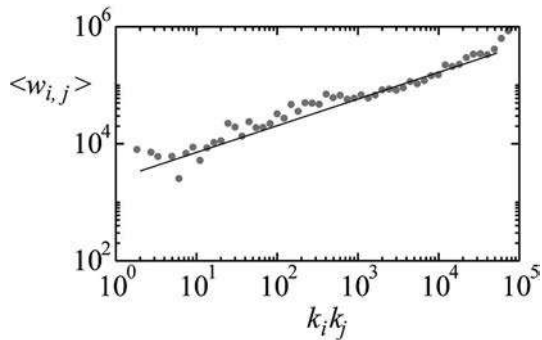


Рис. 10.12. Зависимость средней мощности узла $s(k)$ от степени k . Черные кружки (●) соответствуют реальным данным сети международной ассоциации воздушного транспорта, квадраты (□) — модельной сети со случайно установленными связями; штрих-пунктирная линия соответствует теоретической

зависимости $s(k) = \langle w \rangle k$, сплошная линия — степенному закону с показателем степени 1,5

Рис. 10.13. Средний вес связи в зависимости от степени начального и конечного узла (●) для сети международной ассоциации воздушного транспорта. Сплошная линия соответствует степенному закону $\langle w_{ij} \rangle \sim (k_i k_j)^\vartheta$ с показателем степени $\vartheta = 0,5$



тем большее количество пассажиров он обслуживает.

Еще одним следствием корреляции является зависимость веса связи w_{ij} между узлами i и j от степеней этих узлов k_i и k_j (т.е. от степеней начальной и конечной точек, которые соединены рассматриваемой связью). Как показывают результаты проведенных исследований (см. рис. 10.13), для сети международной ассоциации воздушного транспорта среднее значение веса связи может быть аппроксимировано с хорошей степенью точности степенной зависимостью $\langle w_{ij} \rangle \sim (k_i k_j)^\vartheta$, с показателем степени $\vartheta = 0,5 \pm 0,1$. Показатель степени ϑ связан с показателем степени β , как $\beta = 1 + \vartheta$.

Если пренебречь топологическими корреляциями между степенями связанных узлов, то можно записать, что $s(k) \sim k(k k_j)^\vartheta$, что и приводит к соотношению $\beta = 1 + \vartheta$.

10.4. Иные реальные сети

Очевидно, что подавляющее большинство глобальных систем в природе состоит из большого числа сильно связанных друг с другом подсистем. В последние десятилетия интенсивное развитие компьютерных технологий, прежде всего связанных с созданием больших и эффективных баз данных, послужило предпосылкой для детального анализа сложных сетей из самых различных областей науки и окружающей нас действительности. Основной вывод, который следует из большого числа проведенных исследований, заключается в том, что, несмотря на существенные различия, подавляющее большинство реальных сетей характеризуется одними и теми же топологическими свойствами, такими как относительно малое значение характерной длины пути, высокая кластеризация узлов, наличие определенных закономерностей в распределениях

степеней узлов, корреляция степеней узлов и т.д. Все это вместе взятое сильно отличает реальные сети от регулярных сетей (цепочек, решеток) и случайных графов (которые являются стандартными объектами изучения математической теории графов).

Как следствие большое внимание исследователей было направлено на изучение и понимание основных эволюционных механизмов, которые обуславливают топологию реальных сетей, что позднее привело к разработке новых моделей сетевых структур, позволяющих описать наиболее важные свойства реальных сетей, обнаруженные эмпирически. К числу таких свойств относятся, например, эффект *малого мира* (*small-world*) и свойство *масштабной инвариантности* (*scale-free*).

Изучение реальных сетей выявило существование кратчайших путей, связей, являющихся мостиками между удаленными областями сети. Наличие подобных путей существенным образом ускоряет процессы коммуникации между такими, весьма удаленными друг от друга областями сети. В регулярной решетке размерности D среднее число узлов, которые необходимо пройти, чтобы достичь некоторого произвольно выбранного узла, растет с увеличением размера сети (с увеличением числа элементов N) как $N^{1/d}$. Однако в подавляющем большинстве реальных сетей, несмотря на их колоссальный размер, существуют относительно короткие пути между двумя произвольными узлами. Это свойство, известное как эффект малого мира, с математической точки зрения характеризуется средним значением кратчайшего пути L , которое в большинстве случаев зависит от размера сети как логарифм ($L \sim \ln N$). Впервые этот эффект был обнаружен в 60-е гг. XX в. при анализе сетей, возникающих в социальных отношениях.

В первом эксперименте С. Милгрэм (Milgram, 1967; Korte et al., 1970) просил случайным образом выбранных людей из штата Небраска с разными социально-экономическими характеристиками (160 человек) отправить письма незнакомым людям в Бостоне (штат Массачусетс), о которых им сообщались минимальные сведения — имя, адрес и род занятий. Письма можно было отправлять только людям, которых текущий держатель письма хорошо знал и которые предположительно были ближе к финальному адресату. Всех участников эксперимента, задействованных в цепочке пересылки писем, просили сообщать исследователям сведения о своих социальных характеристиках, а также о характеристиках тех индивидов, от которых они получили и которым переслали конверт.

Несмотря на прогнозируемые ожидания, что потребуется порядка сотни подобных пересылок, чтобы письмо было доставлено адресату, выяснилось, что в среднем необходимо порядка шести итераций, чтобы письмо дошло до цели. Позднее (Dodds et al., 2003) подобный эксперимент был повторен с пересылкой сообщений по всемирной сети Интернет. Следует отметить, что свойство малого мира наблюдается в большом количестве сетей, включая техногенные. В частности, сеть международной ассоциации воздушного транспорта, рассмотренная выше, также обладает свойством малого мира, поскольку среднее значение кратчайшего пути для этой сети составляет $L = 4,37$, что является очень малой величиной для сети такого размера.

Еще одним характерным свойством реальных сетей является свойство масштабной инвариантности. Относительно недавно при изучении сетей считалось, что сети, как правило, являются однородными. Однородность во взаимодействующей структуре означает, что почти все узлы сети являются топологически эквивалентными, как, например, в правильной решетке, где каждый узел соединен с другими одинаковым количеством связей. Примером однородных сетей являются сети со случайными связями (*случайные сети*). В такой сети, состоящей из N элементов, возможно наличие всего $N(N-1)/2$ связей, которые существуют с одинаковой вероятностью p . Вероятность того, что узел i такой сети имеет степень $k_i = k$, определяется биномиальным распределением

$$P(k_i = k) = C_{N-1}^k p^k (1-p)^{N-1-k},$$

где p^k задает вероятность существования у этого узла k связей (каждая с вероятностью p), $(1-p)^{N-1-k}$ — вероятность отсутствия оставшихся $(N-1-k)$ связей из $(N-1)$ возможных, а

$$C_{N-1}^k = \frac{(N-1)!}{k!(N-1-k)!} -$$

число сочетаний из $(N-1)$ по k , определяющее возможные способы выбора узлов, с которым у рассматриваемого есть связи. Поскольку все узлы в такой случайной сети статистически эквивалентны, то для каждого узла будет характерно то же самое биномиальное распределение, и вероятность того, что случайно выбранный узел сети имеет k связей, будет описываться также биномиальным распределением. Для больших сетей (с большим ко-

личеством элементов N) при фиксированном значении среднего числа связей $\langle k \rangle$ биномиальное распределение переходит в распределение Пуассона

$$P(k) = e^{-\langle k \rangle} \frac{\langle k \rangle^k}{k!}.$$

С учетом того, что, как отмечалось выше, типичным предположением при изучении сетей являлась гипотеза об их однородности, нет ничего удивительного в том, что когда ученые начали изучать реальные сети, основываясь на существующих базах данных, они ожидали обнаружить распределение степеней узлов, локализованное около некоторого среднего значения и описываемое распределением, близким к распределению Пуассона. Но, вопреки всем ожиданиям, было обнаружено, что большинство реальных сетей демонстрирует степенной характер распределения степеней узлов, описываемый функцией $P(k) = Ak^{-\gamma}$ с показателем степени, лежащим в диапазоне значений $2 < \gamma < 3$. Среднее значение $\langle k \rangle$ в таких сетях определено и ограничено, тогда как дисперсия $\sigma^2 = \langle k^2 \rangle - \langle k \rangle^2$, в которой доминирующую роль играет второй момент распределения, расходуется как

$$\langle k^2 \rangle = \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} k^2 P(k) dk \sim k_{\max}^{3-\gamma}$$

с ростом верхнего предела интегрирования $k_{\max}$.

Подобные сети получили название масштабно-инвариантных сетей (scale-free network), поскольку степенной закон $Ak^{-\gamma}$ проявляется на всех масштабах наблюдения. Следует отметить, что степенная зависимость, будучи решением уравнения $f(\alpha x) = \beta f(x)$, является единственной нелинейной функцией, которая остается неизменной при масштабировании независимой переменной x . Степенной закон играет важную роль в статистической физике, поскольку он связан с описанием фазовых переходов и фрактальных объектов. Говоря о масштабно-инвариантных сетях, подразумеваются сети, в которых распределение степеней узлов описывается степенным законом, при этом остальные измеряемые структурные характеристики, разумеется, могут этому закону и не подчиняться. Подобные масштабно-инвариантные сети обладают очень неоднородным распределением степеней узлов, когда одновременно, наряду с наличием нескольких узлов, связанных с

очень большим числом других узлов (так называемые *центры, the hubs*), существует большое количество узлов с очень маленьким числом связей.

Важно отметить, что реальные масштабно-инвариантные сети, обладающие пусть даже очень большим, но конечным размером, характеризуются степенными распределениями с «тяжелыми хвостами». При анализе естественных сетей для больших величин k начинает сказываться бедность статистики (сколь бы велика ни была анализируемая сеть), поскольку элементов сети с такими степенями оказывается очень немного, и каждый из этих элементов начинает вносить значительный вклад в характер распределения, в результате чего возникают естественные флуктуации в представлении данных. В подобных случаях оказывается целесообразным анализировать так называемое *кумулятивное* распределение степеней

$$P_{\text{cum}}(k) = \sum_{k'=k}^{\infty} P(k').$$

В этом случае при суммировании флуктуации, присутствующие в изначальном распределении $P(k)$, оказываются сглаженными. При этом, если исходное распределение $P(k)$ подчиняется степенному закону $P(k) \sim k^{-\gamma}$, то показатель степени γ может быть получен из кумулятивного распределения как наклон графика $P_{\text{cum}}(k)$ в двойном логарифмическом масштабе плюс единица, поскольку $\gamma = 1 + \gamma_{\text{cum}}$.

Глобальная сеть Интернет на уровне рассмотрения автономных систем в полной мере демонстрирует свойство масштабной инвариантности. На рис. 10.14

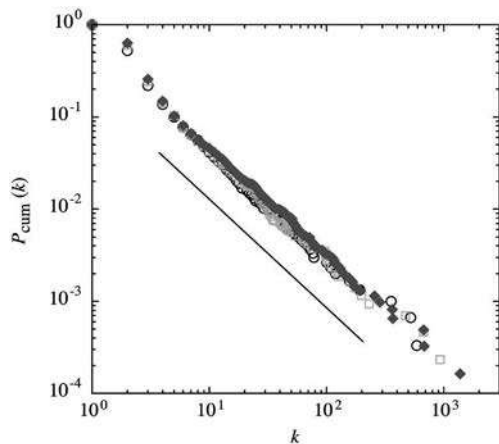


Рис. 10.14. Кумулятивное распределение степеней узлов глобальной сети Интернет при рассмотрении на уровне автономных систем для трех различных лет. Отчетливо виден степенной характер распределений, для сравнения сплошной линией показана соответствующая степенная зависимость

приведено кумулятивное распределение степеней узлов глобальной сети Интернет для трех различных лет (Pastor-Satorras et al., 2001). Как отчетливо видно из рисунка, несмотря на то, что Интернет является динамично развивающейся (и, соответственно, интенсивно изменяющейся) структурой, несмотря на возникновение новых узлов и исчезновение старых, свойство масштабной инвариантности глобальной информационной сети остается неизменным.

10.5. Пространственно-распределенные сети

Существует определенный класс сетей, которые встроены в реальное пространство, т.е. такие сети, узлы которых расположены в определенных точках двумерного или трехмерного евклидова пространства. Типичными примерами таких сетей являются рассмотренные выше информационные и транспортные сети, электрические сети, системы улиц и т.п. Как правило, при рассмотрении таких сетей основной акцент делается на анализе топологических свойств сетей, тогда как аспекту пространственного размещения узлов уделяется существенно меньше внимания или же им совсем пренебрегают. Особенности пространственного размещения узлов сети накладывают определенные ограничения и обуславливают некоторые важные характеристики таких сетей.

В частности, степени узлов оказываются ограниченными в пространственных сетях, поскольку количество связей, которыми может быть соединен с другими узлами рассматриваемый узел, физически ограничено наличием (точнее, отсутствием) свободного пространства. Это отчетливо ясно для *плоских сетей*¹, таких как структура улиц (см., например, рис. 10.4, на котором приведена сеть дорог города Минска).

Еще одной особенностью пространственных сетей является то, что два удаленных друг от друга узла оказываются связанными друг с другом с малой вероятностью, поскольку стоимость создания и поддержания такой связи очень высока.

Важно обратить внимание собственно на пространственное распределение узлов сети. Пространственные сети характеризуются сильными ограничениями, наложенными на них географическими особенностями. Интересным фактом, в частности, является

¹ Плоской сетью называются такие сети, узлы которых формируются пересечением связей (как перекрестки возникают при пересечении улиц). Для сетей, которые не являются плоскими, связи могут пересекаться, не формируя при этом узел.

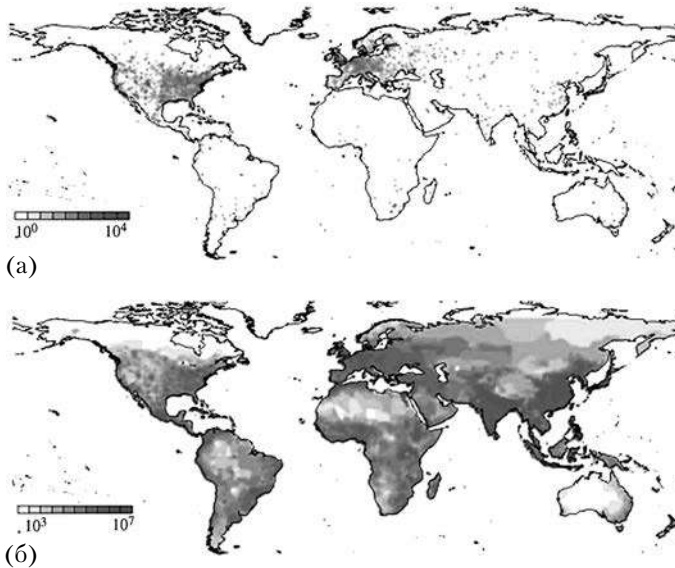


Рис. 10.15: (а) — распределение роутеров и (б) — распределение плотности населения. В обоих случаях каждая точка (ячейка) представляет собой участок территории Земли размером $1^\circ \times 1^\circ$. Интенсивность отображает значение плотности соответствующей величины, максимальная плотность численности популяции — 10^7 человек/ячейку, плотность роутеров — 107 роутеров/ячейку (Yook et al., 2002)

то, что узлы глобальной сети Интернет демонстрируют фрактальные свойства, повторяя фрактальный характер народонаселения мира (Yook, 2002). Рисунок 10.15 иллюстрирует сильную корреляцию между географической плотностью народонаселения мира и географическим распределением роутеров глобальной сети Интернет в экономически развитых странах.

Понятия «*фрактал*» и тесно связанное с ним понятие *фрактальной размерности* подробно рассматриваются в главе 2, в которой читатель найдет подробные объяснения и примеры. Здесь же мы только отметим, что, согласно Б. Мандельброту (Федер, 1991), фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому, а свойства самоподобия такого объекта с количественной точки зрения характеризуются фрактальной (или емкостной) размерностью.

Теория фракталов в настоящее время находит широкое применение при изучении различных глобальных процессов в экономике, политике, финансовой сфере. Так, можно считать доказанным с использованием методов теории фракталов на основе анализа

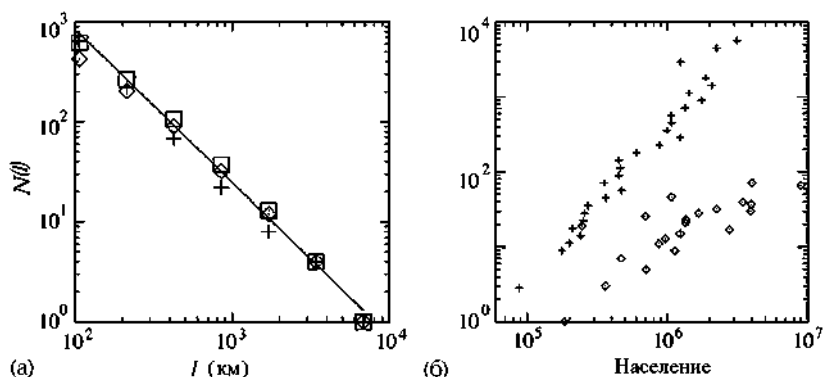


Рис. 10.16: (а) — расчет фрактальной размерности для распределений народонаселения (+), роутеров (□) и автономных систем (◇). Зависимости числа заполненных ячеек (для населения/роутеров/доменов) размером $l \times l$ от размера ячейки l для Северной Америки показаны в двойном логарифмическом масштабе. Сплошная линия соответствует степенной зависимости с показателем $D_f = 1,5$; (б) — зависимость числа роутеров (+)/доменов (◇) в ячейке размером $1^\circ \times 1^\circ$ от численности населения, проживающего в этой же самой области

большого числа финансовых данных, что рынки имеют фрактальную природу (Петерс, 2000; Петерс, 2004). Методы фрактальной геометрии, статистической физики и теории хаоса широко используются при анализе рынков капитала и долгосрочных прогнозов поведения рынков и входят в комплект инструментов любого финансового аналитика наряду с другими более традиционными методами.

Для анализа пространственного распределения народонаселения и узлов глобальной сети Интернет (рассматриваемой на уровне как роутеров, так и автономных систем) также использовался расчет фрактальной размерности.

Результаты такого рассмотрения, представленные на рис. 10.16 (а), показывают, что каждое распределение характеризуется фрактальной размерностью $D = 1,5 \pm 0,1$. Совпадение между величинами фрактальной размерности для народонаселения и узлов сети Интернет (как автономных систем, так и роутеров) означает, что высокая плотность населения предъявляет высокие требования к качеству интернет-сервисов, что влечет за собой высокую плотность и роутеров, и доменов. Рисунок 10.16 (б) иллюстрирует, что плотность доменов и роутеров растет монотонно (и, можно сказать, линейно) с ростом плотности популяции.

10.6. Моделирование сетей

Как уже отмечалось, важную роль в изучении сетей играет разработка новых моделей сетевых структур, позволяющих описать наиболее важные свойства реальных сетей, обнаруженные эмпирически. С некоторой долей условности все модели сетей можно разделить на три больших класса: случайные сети, сети малого мира и масштабно-инвариантные сети. Каждый из этих классов характеризуется своими свойствами, и, соответственно, для каждого класса существуют методы построения подобных моделей. Настоящий раздел будет посвящен описанию основных методов построения подобных сетевых моделей, хотя, конечно же, на настоящий момент существует большое количество разновидностей и модификаций этих методов.

Систематическое изучение случайных сетей было начато в 1959 г., в основе которого лежало применение вероятностных подходов (Erdős et al., 1959). В центре внимания исследователей находились свойства сетей, связи между элементами которых установлены случайным образом, и то, как эти свойства ведут себя при увеличении числа элементов сети или количества связей между элементами. Существуют два основных способа построения случайной сети. Один из этих способов заключается в том, что к N несвязанных друг с другом узлов в рассматриваемый ансамбль начинают случайным образом добавлять связи (связывая друг с другом два случайным образом выбранных узла), избегая при этом множественных связей (т.е. если два узла связаны между собой, то на последующих итерациях добавления новых связей между этими узлами уже не может быть добавлена новая связь). Процесс построения случайной сети останавливается, когда число связей достигает заранее выбранного значения K . Альтернативный способ построения случайной сети заключается в соединении каждой пары узлов сети связью с вероятностью $0 < p < 1$. В этом случае попарно перебираются все узлы сети, и процесс построения случайной сети прекращается, когда рассмотрены все N элементов.

Эти две модели тесно связаны друг с другом, хотя имеют и различия. В частности, при построении случайной сети по первому методу, если построить несколько сетей, каждая из них будет иметь N узлов и K связей. Иными словами, эти сети будут различаться только топологией связей между элементами. При построении случайных сетей по второму методу количество связей

в каждой из этих сетей может различаться, и сеть с количеством связей K будет появляться с вероятностью $p^K(1-p)^{N(N-1)/2-K}$. Обе модели в пределе большого числа элементов (при $N \rightarrow \infty$) при фиксированном значении $\langle k \rangle$ (что соответствует фиксации величины $2K/N$ для первой модели и $p(N-1)$ — для второй) совпадают друг с другом. Как уже отмечалось выше, в случайной сети распределение степеней узлов является биномиальным и в пределе больших сетей подчиняется закону Пуассона.

Процедура построения сети, демонстрирующей свойство малого мира, заключается в следующем (Watts et al., 1998). Отправной точкой является сеть из N элементов, которые связаны друг с другом в кольцо $K = mN$ связями: каждый элемент связан со своими $2m$ ближайшими соседями. Каждая связь каждого узла, которая находится от него в направлении вращения часовой стрелки, разрывается с вероятностью p , и вместо нее данный узел соединяется новой связью с любым другим узлом, выбранным случайным образом. Очевидно, что с вероятностью $1-p$ эта связь будет сохранена. После обработки всех узлов для $0 < p < 1$ получается сеть, обладающая свойством малого мира. Следует обратить внимание, что при $p = 0$ получается регулярная сеть, тогда как для $p = 1$ данный метод приводит к случайной сети.

Существуют методы построения моделей масштабно-инвариантных сетей. Один из таких методов (пришедших из физического сообщества) базируется на предположении, что каждый из узлов сети обладает некоторыми свойствами. Каждому узлу i присваивается некоторое значение (приспособленность) $w_i = i^{-\alpha}$, где $i = 1, 2, \dots, N$ — номер узла и $\alpha \in [0, 1)$ — некоторый управляющий параметр. Два узла i и j выбираются с вероятностями, равными нормированным приспособленностям

$$p_i = \frac{w_i}{W}, \quad p_j = \frac{w_j}{W},$$

где

$$W = \sum_{l=1}^N w_l.$$

Если эти узлы еще не связаны друг с другом, то между ними устанавливается связь, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет создано mN связей, так что $\langle k \rangle = 2m$. При выборе $\alpha = 0$ в результате применения этого метода получается случайная сеть

(поскольку все элементы сети оказываются одинаковыми и равноправными), а $\alpha \neq 0$ дает масштабно-инвариантную сеть со степенным распределением степеней узлов $P(k) = k^{-\gamma}$, где показатель степени определяется соотношением $\gamma = 1 + 1/\alpha$.

Литература к главе 10

- Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. М.: Мир, 2000.
- Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков. Применение теории хаоса в инвестициях и экономике. М.: Интернет-Трейдинг, 2004.
- Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991.
- Мэтьюз Р. Мировая взаимозависимость // Экономические стратегии. 2010. № 2. С. 72–73.
- Barrat A., Barthélemy M., Pastor-Satorras R., Vespignani A. The architecture of complex weighted networks // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2004. Vol. 101. P. 3747.
- Boccaletti S., Latora V., Moreno Y., Chavez M., Hwang D.-U. Complex networks: Structure and dynamics // Physics Reports. 2006. Vol. 424. P. 175.
- Dodds P.S., Muhamad R., Watts D.J. An experimental study of search in global social networks // Science. 2003. Vol. 301. P. 827.
- Echenique P., Gómez-Gardeñes J., Moreno Y., Vázquez A. Distance-d covering problems in scale-free networks with degree correlations // Physical Review E. 2005. Vol. 71. P. 035102(R).
- Erdős P., Rényi A. On random graphs // Publicationes Mathematicae Debrecen. 1959. Vol. 6. P. 290.
- Korte C., Milgram S. Acquaintance linking between white and negro populations: application of the small world problem // Journal of Personality and Social Psychology. 1970. Vol. 15. P. 101.
- Milgram S. The small world problem // Psychology Today. 1967. Vol. 2. P. 60.
- Pastor-Satorras R., Vázquez A., Vespignani A. Dynamical and Correlation Properties of the Internet // Physical Review Letters. 2001. Vol. 87. P. 258701.
- Watts D.J., Strogatz S.H. Collective dynamics of 'small-world' networks // Nature. 1998. Vol. 393. P. 440.
- Yook S.-H., Jeong H., Barabási A.-L. Modeling the Internet's large-scale topology // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2002. Vol. 99. P. 13382.



Заключение

В замечательной книге Ю.И. Неймарка (Неймарк, 2004, с. XIV, XVI) автор пишет: «Что такое модель? Слово “модель” из итальянского языка и означает “копия, образец, прототип”, изучив который, мы познаем оригинал. Значит, математическая модель — это прототип какой-то части мира — объекта, системы, устройства, машины, процесса, прибора, изучая который, мы постигаем эту часть мира...» Если модель типовая или, как уже упоминалось, эталонная, то с ее помощью можно постичь не одну, а разные части мира.

В настоящем издании рассмотрены несколько таких математических моделей: логистическое уравнение, модель «хищник-жертва», модель роста населения Земли, сетевые модели, модель «ядерной зимы» и, пожалуй, самая претенциозная модель «Мировой динамики» Дж. Форрестора и её развитие в моделях Д. Медоуза и других (модели «Мир-1», «Мир-2», «Мир-3»).

В предисловии авторов к книге «Пределы роста. 30 лет спустя» (Донелла Медоуз, Йорген Ранدرس, Деннис Медоуз, 2007) есть такие слова: «Сначала пределы роста были делом отдалённого будущего. Сейчас они очевидны. Сначала глобальная катастрофа казалась чем-то непостижимым, нереальным, невозможным. Сейчас об этом рассуждают многие, хотя скорее как об отдалённой перспективе, некой гипотетической возможности... Сценарии, приведенные в этой книге, показывают, что в первое десятилетие XXI века рост будет продолжаться — так же, как это показывали сценарии «Пределов роста» 30 лет назад... Мы планируем выпустить четвёртое издание в 2012 г., в сороковую годовщину выхода первой книги. К тому времени, наверное, будет предостаточно статистических данных, подтверждающих выход за пределы. Тогда мы сможем подтвердить свою правоту или будем вынуждены признать, что технологии и рыночная экономика сумели отодвинуть глобальные пределы вверх, намного выше, чем потребности человеческого общества. Либо уменьшение численности населения и упадок экономики будут неизбежны, либо мир будет располагать ещё многими десятилетиями для роста. Пока не вышло четвёртое издание, вам придётся формировать своё собственное мнение о причинах и следствиях экологической нагрузки».

И вот книга «2052. Глобальный прогноз на следующие сорок лет» на английском языке, представляющая доклад Римскому

клубу, вышла в свет. Её написал один из соавторов «Пределов роста» норвежский экономист и футуролог Йорген Рандерс (<http://www.clubofrome.org>).

По-существу, делается попытка ответить на вопрос: «Переживём ли мы XXI век?» По мнению профессора Рандерса, коллапс мира неизбежен, причём по сравнению с 1972 годом (модель «Мир-3») он ещё более очевиден. Деннис Медоуз в своём докладе на ежегодной ассамблее Римского клуба в Бухаресте (Румыния, 1—2 октября 2012 г.) ещё более пессимистичен, описывая перспективу цивилизации. Рандерс на ассамблее выступил с тем же докладом, что и на презентации своей книги. Он считает, что Киотский протокол, расширенное использование альтернативной энергетики всё же отодвинет коллапс от человечества. Медоуз считает, что эти меры неэффективны: Европа, следуя Киотскому протоколу, сокращает выбросы углекислого газа в атмосферу, в то же время Китай, наращивая своё производство, нивелирует старания Европы по уменьшению парникового эффекта. Истощение артезианских вод, сокращение количества еды на душу населения, уменьшение запасов полезных ископаемых демонстрируют, по Медоузу, начало коллапса.

Как считает Йорген Рандерс, в ближайшие десять лет кардинально мало что изменится. Будут расти экономики, будет расти и производство пищи. Последнее будет связано с глобальным потеплением, которое увеличит площадь земель, пригодных для выращивания сельскохозяйственных культур. Рост населения замедлится, но не остановится. К 2052 г. на Земле будет жить уже более 8 млрд человек.

Однако с ростом средней температуры на нашей планете наводнения из-за таяния ледников, опустынивание некогда плодородных земель и все чаще происходящие лесные пожары увеличат риск вымирания человечества. Лесные пожары превратят леса из производителей кислорода в его потребителей. «Очень вероятно, что задолго до середины века у нас будут войны», — считает Рандерс, имея в виду локальные конфликты между странами, ещё располагающими пригодными для сельского хозяйства землями, и теми, кто уже почти не имеет их. Локальные конфликты могут спровоцировать глобальную войну, которая сократит население Земли до 4 млрд человек.

Правда, если обратиться к истории, взять исходные данные каменного века и смоделировать развитие человечества в ту далёкую эпоху, то вымирание мамонтов и ограниченные запасы

кремния, который использовался для изготовления орудий труда, должны были привести к вырождению человека, чего не произошло. Следует надеяться, что и сейчас *Homo sapiens* найдёт выход из чрезвычайного положения, хотя, судя по прогнозам, человечество ждет серьёзные потрясения. Хочется думать, что исследования в области нелинейной динамики социосферы, биосферы и урбосферы, помимо изучения и описания того, что происходит и что произойдёт, помогут ответить на важнейший вопрос, что делать, чтобы цивилизация не погибла.

Эрвин Ласло во введении к книге «Век бифуркации. Постижение изменяющегося мира» (www.koob.ru) так характеризует свою книгу: «Наше время стало свидетелем разительных перемен, которые перевели основополагающую идею-представление о том, что наш мир и в будущем, как и прежде, будет зависеть от того, что думаем, говорим и делаем мы, люди, — из области банальных истин в область научных принципов. Эту книгу надлежит рассматривать в первую очередь как аргумент в пользу такой посылки, понимаемой в новом смысле. Содержание книги представляет собой своего рода краткое изложение идей, подтверждающих желательность принятия особой ориентации на глобальные проблемы — ориентации, которую мы называем подходом на основе общей теории эволюционных систем — в новом её понимании. Наконец, эта книга — призыв к применению такого подхода к острейшим проблемам, с которыми неизбежно столкнёмся и уже начинаем сталкиваться при новом понимании цели и мы сами как биологический вид, и планета как общий дом, в котором мы живём.

Проблемы жгучи, ставки огромны, возможности выбора впечатляющи. Мы живём в поистине интересные времена, и это вполне объяснимо: мы живём в век величайшей бифуркации за всю историю человечества».

Авторы данной книги берут на себя смелость считать, что слово Э. Ласло в известной степени характеризуют и их книгу.



Научное издание

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ПРИРОДЕ И ОБЩЕСТВЕ

Под редакцией И.В. Ильина, Д.И. Трубецкова,
А.В. Иванова

Редактор *И.Е. Новикова*

Художник *Н.Н. Аникушин*

Художественный редактор *Г.Д. Колоскова*

Технический редактор *З.С. Кондрашова*

Верстка *Л.В. Тарасюк*

Подписано в печать 09.01.2014. Формат 60×90¹/₁₆.
Бумага офсетная. Офсетная печать.
Гарнитура PetersburgC. Усл. печ. л. 28,5
Уч.-изд. л. 25,21. Тираж 500 экз.
Изд. № 9989. Заказ

Издательство Московского университета.
125009, Москва, ул. Б. Никитская, 5.
Тел.: (495) 629-50-91. Факс: (495) 697-66-71.
Тел.: (495) 939-33-23 (*отдел реализации*).
E-mail: secretary-msu-press@yandex.ru

Сайт Издательства МГУ:
www.msu.ru/depts/MSUPubl2005
Интернет-магазин: <http://msupublishing.ru>

Адрес отдела реализации:
Москва, ул. Хохлова, 11 (Воробьевы горы, МГУ).
E-mail: izd-mgu@yandex.ru. Тел.: (495) 939-34-93

Отпечатано в типографии МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15