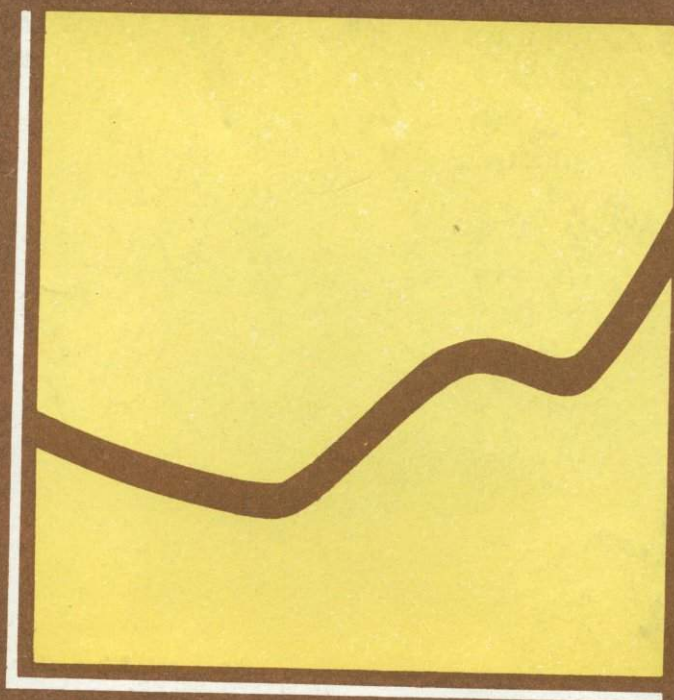


В. С. ГОЛУБЕВ

Модель эволюции геосфер



« Наука »

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ЛИТОСФЕРЫ

В.С. ГОЛУБЕВ
МОДЕЛЬ
ЭВОЛЮЦИИ
ГЕОСФЕР

5237
Ответственный редактор
академик А.Л. ЯНШИН



МОСКВА "НАУКА"
1990



Модель эволюции геосфер / В.С. Голубев. — М.: Наука, 1990. — 95 с. — ISBN 5-02-002116-4

В книге рассмотрены фактические данные по эволюции в неживой и живой природе, общие и специфические закономерности сопряженных геохимических процессов и биологических процессов. Предложена модель геохимического цикла углерода, модель эволюции сопряженных процессов минералообразования, проанализированы факторы эволюции биосферы. Дано введение в теорию ноосферы. Проанализированы причины, обуславливающие необходимость вступления человечества на путь интенсивного развития. Рассмотрен термодинамический критерий интенсивного развития. Проанализирована роль ограниченности природных ресурсов и загрязнения окружающей среды в эволюции ноосферы.

Для широкого круга читателей, интересующихся вопросами эволюции, знакомых с основами термодинамики и высшей математики.

Ил. 13. Библиогр.: 51 назв.

Рецензенты: *А.А. Беус, В.А. Теняков*

Редактор *Е.В. Андреева*

Virtual data on the evolution in both animate and inanimate nature, besides general and specific regularities of the conjoined geochemical and biological processes are considered in the book. The author puts forward a model of geochemical cycle of carbon and analyses the factors of the evolution of the biosphere, he also gives introduction into the theory of the noosphere. The work contains analysis of the causes defining the necessity making the mankind enter the route of intensive development. The author considers the thermodynamic criteria of the intensive development. The work reads about the role of the factor of the natural resources being exhaustive and also about the contamination of the environment in the course of the evolution of the noosphere.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема эволюции, происхождения жизни интересовала человека с древнейших времен. По мере становления и развития наук она занимала и продолжает занимать во многих из них одно из центральных мест. В других, сравнительно новых науках (биофизика, биохимия и др.) ей еще предстоит играть одну из главных ролей.

Термодинамический подход к проблеме эволюции возник в XIX в. в связи с установлением второго начала термодинамики, которое показывает, что энергия изолированной системы рассеивается, обесценивается. В связи с этим возникла концепция "тепловой смерти" Вселенной. В явном противоречии с этой концепцией находилась биологическая эволюция, которая идет по пути усложнения структур (живых организмов).

Дальнейшее развитие термодинамической концепции эволюции связано с развитием в XX в. неравновесной термодинамики. Стало ясно, что биологические системы относятся к открытым системам, обменивающимся веществом и энергией с окружающей средой. Поэтому термодинамическая концепция эволюция изолированных систем имеет к биологическим объектам лишь косвенное отношение. Были предложены концепции эволюции открытых систем и рассмотрено их приложение к биологическим объектам. При этом выявилось резкое расхождение во взглядах на биологические объекты: одни исследователи считают их близкими к равновесным (но неравновесными по отношению к окружающей среде), тогда как другие — далекими от равновесия.

В предлагаемой книге последовательно, на основе оригинальных исследований обсуждается проблема эволюции открытых систем с сопряженными процессами, к числу которых относятся и биологические объекты. После краткого обзора фактов эволюции на Земле (гл. 1) рассматриваются наиболее яркие примеры сопряженных процессов в неживой природе (гл. 2). На этой основе формулируется термодинамическая модель открытой системы с сопряженными процессами (гл. 2), в рамках которой и обсуждается затем эволюция в неживой (гл. 3) и живой (гл. 5, 6) природе. Приложению модели к биологическим объектам предваряется обсуждение общих закономерностей геохимических и биологических процессов (гл. 4). Рассматривается общая теория эволюции открытых систем с сопряженными процессами концентрирования вещества и ее возможное приложение к эволюции ноосферы (гл. 6).

Для формирования представлений автора об эволюции основное значение имело учение В.И. Вернадского о биосфере и ноосфере. Эти представления не могли бы возникнуть и без знакомства со многими замечатель-

ными работами по применению термодинамики к биологии и математическому моделированию в экологии. Особенно полезным было знакомство со взглядами академика Н.Н. Моисеева, а также сам факт работы в Институте литосферы АН СССР, где академик А.Л. Яншин неустанно подчеркивал первостепенную важность биосферных исследований. Чрезвычайно плодотворным для автора было использование предложенных советскими геохимиками концепций геохимических барьеров (А.И. Перельман) и энергии рудообразования (Н.И. Сафронов).

Именно объединение этих концепций позволило автору прийти к одному из основных положений работы — сопряженные процессы в открытых системах неживой природы реализуются на подвижных геохимических барьерах лишь при конвективном подводе вещества и энергии к системам. Геологической же основой, фундаментом развиваемых представлений послужили работы советских исследователей по эволюции геологических процессов.

Предлагаемая книга адресуется широкому кругу читателей, интересующихся вопросами естествознания, в первую очередь геологам и специалистам смежных наук. Она содержит изложение проблемы эволюции на "сниженном" уровне сложности: для чтения книги достаточно знать основы химической термодинамики и высшей математики. Для простоты изложения автор не использует аппарата дифференциальных уравнений в частных производных, а обходится доступными алгебраическими приемами.

Затрагивая проблему эволюции в смежных науках, автор в ряде случаев сознательно ограничивается только постановкой проблемы, надеясь на полезность такого рода постановки для специалистов.

Автор благодарен многим товарищам, с которыми он плодотворно обсуждал и решал проблему эволюции, в особенности: Г.П. Аксенову, А.А. Беусу, Г.А. Булкину, А.А. Величко, А.А. Гарибянцу, И.Г. Ганеву, А.Н. Киргинцеву, Г.Н. Кричевцу, О.Б. Кузовлевой, А.В. Лапо, Ю.М. Малиновскому, Е.С. Попову, А.И. Перельману, О.Б. Птицыну, В.А. Тенякову, Ю.П. Трухину, В.Н. Шарпову.

Автор признателен академику А.Л. Яншину за поддержку идей книги.

Не являясь специалистом в ряде научных областей, к которым имеет отношение развиваемая концепция эволюции, автор понимает, сколь незавершенна его попытка решить кардинальные вопросы естествознания. Вместе с тем автор глубоко убежден, что без синтетических исследований (к которым относится и предлагаемая книга) невозможен прогресс науки, ибо реальные проблемы, с которыми сталкивается современное человечество, имеют именно синтетический характер.

ВВЕДЕНИЕ

Эволюция в широком смысле — синоним развития, в узком — один из основных типов развития, при котором изменения объектов в направлении более высокого уровня организации и дифференциации вещества происходят постепенно (в отличие от революции, при которой эти изменения происходят скачком). В геологической литературе термин эволюция обычно используется как синоним развития. Следуя этой традиции, автор наряду с термином "эволюция" использует более узкие термины: "прогрессивная эволюция" и "регрессивная эволюция". При прогрессивной эволюции постепенные изменения объектов происходят в направлении более высокого уровня организации и дифференциации вещества, при регрессивной — наоборот.

Эволюционные представления широко распространены в различных естественных науках, особенно в геологии и биологии. Эволюция в неживой природе происходит по пути все большего удаления со временем природных минеральных объектов (по составу и структуре) от усредненных по земной коре, по пути все большей дифференциации вещества коры во времени. Предбиологическая эволюция означала переход от геологической к более совершенной биологической форме движения материи. Эволюция в живой природе происходит по пути улучшения приспособляемости организмов к среде жизнеобитания.

Многие исследователи указывают на замечательное сходство эволюции в живой и неживой природе. Но этот вывод носит по существу качественный интуитивный характер, поскольку при этом не вводятся и не обсуждаются количественные характеристики эволюции открытых систем. При таком обсуждении должны с неизбежностью решаться вопросы о том, какие системы следует относить к эволюционирующим, каков количественный критерий эволюции, в чем ее причины.

В XIX в. в естественных науках одновременно и независимо существовали две противоположные эволюционные концепции. Термодинамика показала, что со временем происходит рассеяние, обесценивание энергии, разрушение структур; а биология — что развитие происходит по пути усложнения структур и функций живого организма. Обе концепции, совершенно противоположные по своей сути, тем не менее успешно обосновывались опытом. Причины их противоположности тогда не были достаточно ясны. И лишь в XX в. в связи с развитием неравновесной термодинамики стало ясно, что эти концепции относятся к разного типа системам: первая — к закрытым, т.е. не обменивающимся веществом и энергией с окружающей средой, вторая — к открытым системам с сопряженными процессами.

Термодинамика необратимых процессов оказала определенное влияние на биологию. Опыт ее применения выявил также и ограниченность термодинамического подхода к биологическим процессам, обусловив тем самым весьма неоднородное отношение различных исследователей к биологической термодинамике. В связи с этим нелишне заметить, что необратимая термодинамика описывает лишь энергетику открытых химических систем, частным (но наиболее сложным) случаем которых являются и живые организмы. На основе биологической термодинамики можно понять энергетику жизни и только ее. Вместе с тем термодинамика позволяет навести мосты между неживой и живой природой и тем самым продвинуться вперед в понимании происхождения и сущности жизни. Для этого надо проанализировать энергетику открытых систем Земли, в которых протекают сопряженные химические реакции, ввести термодинамический критерий эволюции и на этой основе проанализировать закономерности геохимической и биологической эволюции.

Количественные представления автора об эволюции возникли в связи с теоретическими и экспериментальными исследованиями динамики природных химических реакций и геохимических процессов. Цель этих исследований — методами математического (теоретического) и физического (экспериментального) моделирования изучить протекание процессов образования горных пород и руд в пространстве и времени. Исследования по динамике геохимических процессов включают в себя неявным образом и проблему их эволюции, т.е. проблему качественных и-количественных изменений геохимических систем. Однако на первом этапе исследований развитые математические модели геохимических процессов еще не были достаточно эволюционными, в них последовательно не учитывалось изменение внешних (граничных) условий развития процессов со временем (обычно допускалось, что эти условия постоянны). Кроме того, для исследования эволюции необходимо было сделать принципиально новый шаг — установить, какие системы относятся к эволюционирующим (прогрессивно эволюционирующим) и каков количественный критерий эволюции.

Эти исследования были выполнены нами. В рамках развитой концепции к эволюционирующим относятся системы с сопряженными процессами, количественная характеристика эволюции была условно названа коэффициентом полезного действия (КПД) сопряженного процесса¹. Проведенные исследования позволили разработать теоретическую модель эволюции как в неживой природе (теорию геохимической эволюции), так и в живой. Отметим в связи с этим, что в биологии теории эволюции в основном акцентируют внимание на том, как эволюция происходит. Развитый подход исследует в основном причины биологической эволюции.

¹ Сопряженными являются такие одновременно идущие процессы, при которых один из них (основной) может протекать в отсутствие другого, тогда как этот другой (сопряженный) осуществляется лишь при наличии основного процесса.

ГЛАВА I

ФАКТЫ ЭВОЛЮЦИИ НА ЗЕМЛЕ

В основе модели эволюции лежат фактические данные по эволюции на Земле. Не претендуя на полноту изложения, рассмотрим некоторые наиболее характерные свидетельства прогрессивной эволюции в неживой и живой природе.

ЭВОЛЮЦИЯ В НЕЖИВОЙ ПРИРОДЕ

Эволюция геологических процессов еще недостаточно изучена. Это связано с тем, что геологические процессы изменяются медленнее, чем объекты живого мира [37]. Познание эволюции геологических процессов, по мнению крупнейших геологов, является одной из основных задач современной геологии [31, 37].

Существуют различные подходы к изучению эволюции геологических процессов. Исследуются условия (среда, обстановка: состав атмосферы, гидросфера, климат, тектоника и др.) протекания геологических процессов в прошлом в сопоставлении с современными; изменения в зависимости от времени формирования геологических объектов — результатов протекания различных геологических процессов (минералов, горных пород, месторождений полезных ископаемых и др.). При этом установлено, что, с одной стороны, одни и те же минералы образуются в разное время, с другой — условия протекания геологических процессов изменялись со временем. На основании этого можно сделать вывод, что в геологической истории менялись не физические и химические законы (они остаются неизменными), а условия их реализации на поверхности и в недрах Земли [37].

Поэтому со временем изменяется не состав природных химических соединений (минералов), а более крупные категории минеральных масс — горные породы, руды и др. Эволюция в неживой природе реализуется на уровне достаточно крупных геологических объектов — формаций [37].

Обобщение данных по эволюции в неживой природе позволило Д.В. Рундквисту сформулировать ряд общих закономерностей геологической эволюции [42, 43]. Остановимся на некоторых из них, представляющих интерес в связи с построением модели эволюции.

Изучение минералов, горных пород, руд и других геологических объектов свидетельствует о необратимой эволюции земной коры, заключающейся во все большей дифференциации вещества в ходе истории, все большей специализации горных пород, руд и других объектов, в усложнении систем минералообразования.

В литосфере процессы эволюции наиболее проявлены в близповерхностной области активного взаимодействия экзогенных и эндогенных факторов, где наблюдаются максимальные градиенты различных параметров среды (температуры, окислительно-восстановительных условий и т.п.). С глубиной уменьшается разнообразие минеральных образований, замедляется темп эволюции.

При изучении сходных минеральных образований, сформировавшихся в разное время, устанавливается все большее ускорение развития процессов во времени.

Характерная черта развития геологических процессов — их многократная повторяемость, пульсационность, ритмичность. Это позволяет по аналогии с живой природой выделять при изучении процессов минералообразования два самостоятельных аспекта: онтогенез и филогенез. Онтогенез рассматривает историю развития индивидов — минералов, горных пород, руд и других объектов, их зарождение, рост, изменение, исчезновение; филогенез — эволюцию процессов минералообразования, приведших к формированию индивидуальных минеральных объектов.

При изучении процессов минералообразования устанавливается следующая закономерность: последовательность развития минеральных образований в ритмах различных порядков (различной длительности) подобна. Так, стадии минерализации обычно имеют тенденцию протекать во времени таким же образом (от высоко к низкотемпературным образованиям), как и развитие самих месторождений. Эволюция минералообразования в кратковременные периоды (стадии, ритмы) повторяет общую эволюцию процесса минералообразования. Эта особенность эволюции сопоставима по смыслу с основным законом биологического развития: онтогенез есть краткое повторение филогенеза.

Характерная особенность эволюции минералообразования заключается в том, что в каждом последующем ритме процесса получают все большее развитие соответственно все более поздние образования общего процесса, в то время как ранние образования угнетаются.

Указанные закономерности эволюции, являющиеся обобщением данных по особенностям состава и структуры разновременных геологических образований, показывают прогрессивную тенденцию геологического развития и свидетельствуют о прогрессивном характере эволюции литосферы.

Наряду с изложенной существует несколько иная точка зрения [48], согласно которой эволюция магматизма и связанного с ним эндогенного рудообразования была несущественной. Отмечается выдержанность магматизма для каждого геологического этапа (от более раннего базальтоидного типа к позднему, гранитному). В соответствии с этим выдержаны и генетические типы эндогенного рудообразования, имеются лишь некоторые количественные изменения — от более древних рудных месторождений базальтоидной серии к гранитоидным. В то же время отмечается существенная эволюция осадочного процесса — от первоначального вулканогенно-осадочного к терригенному, хемогенному и биогенному осадкообразованию.

ЭВОЛЮЦИЯ В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

Доказательства эволюции живой природы так многочисленны, что у любого непредвзятого человека, знакомого с ними, не вызывает сомнений эволюционное развитие живой природы — то, что новые виды организмов возникают из ранее существовавших. Прямые доказательства эволюции дают разнообразные ископаемые организмы, косвенные — многочисленные данные биологии.

Данные палеонтологии дают достаточно полную историю, летопись живого мира на Земле, последовательные формы развития растительного и животного мира. Ископаемые остатки организмов обнаружены в древнейших горных породах (возрастом до 3,5 млрд лет при возрасте Земли 4,5 млрд лет). В самых древних породах (юго-запада Гренландии), известных в настоящее время (возраст 3,76 млрд лет), найден углерод, который по данным изотопных исследований имеет биогенное происхождение [31]. Следовательно, для развития живого мира, его эволюции природа отпустила чрезвычайно широкий временной интервал (не менее 3,76 млрд лет по современным данным).

Анализ ископаемых организмов на этом временном интервале показывает, что все разнообразные растения и животные, существующие в настоящее время, произошли от более простых путем постепенных изменений, накапливавшихся в последовательности поколений. Эволюция организмов обуславливалась изменениями внешней среды жизнеобитания (состава атмосферы, гидросферы, климата и др.) и происходила по пути улучшения приспособляемости организмов к среде жизнеобитания. Это обычно сопровождалось усложнением структур живых организмов и специализацией их функций. Основная тенденция эволюции живого мира имеет прогрессивный характер.

Эволюция протекала не только на основе постепенных изменений организмов. В периоды горообразования, тектономагматической активизации, когда резко возрастала интенсивность вулканических и тектонических процессов (образовывались новые горы, уничтожались одни и появлялись другие моря), происходили резкие перемены в живом мире, уничтожались старые и появлялись новые формы. Так, в конце палеозойской эры, когда появились Аппалачские горы, было уничтожено более 90% существовавших в то время форм жизни. В конце мезозойской эры, в альпийскую горообразовательную эпоху (когда формировались Альпы) вымерли многие пресмыкающиеся (динозавры и др.). Поэтому могут быть выделены главные эпохи эволюции живых систем, когда наиболее интенсивно происходило отмирание старых и зарождение новых организмов. Главные эпохи биологической эволюции установлены в настоящее время и для древнейших времен, для докембрия (более 570 млн лет назад) [49], причем по времени они также соответствуют глобальным эпохам тектономагматической активизации [46].

Существуют многочисленные данные биологии — свидетельства эволюции живого мира. Это данные сравнительного изучения строения растений и животных, в том числе существование рудиментарных (недоразвитых) органов. В организме человека свыше 100 рудиментарных структур — остатков органов, функционировавших у предков. Так, аппендикс — ныне функционирующий орган в пищеварительной системе таких травоя-

ядных животных, как кролик. Это данные эмбрионального развития организмов. На их основе Э. Геккель в 1886 г. сформулировал биогенетический закон, согласно которому развивающиеся зародыши повторяют в сокращенном виде эволюционный путь своих предков, т.е. онтогенез (развитие индивида) — это краткое повторение филогенеза (истории индивида).

Многие данные о современном распространении растений и животных могут быть поняты лишь на основе их эволюционной истории. Так, своеобразный животный мир Австралии обусловлен ее изолированностью, в результате в нем сохранились примитивные млекопитающие, вытесненные в других частях света другими, более приспособленными к среде обитания.

В пользу эволюционного происхождения жизни свидетельствуют также многочисленные данные таких биологических наук, как генетика, физиология, биохимия. Это опыт селекции и разведения культурных растений и домашних животных (генетика), сходство в строении биологических объектов (физиология), близость молекулярных структур соединений (биохимия) и т.д.

На вопрос, как происходит эволюция, впервые обоснованный ответ дала теория естественного отбора Дарвина—Уоллеса. Согласно ей эволюция происходит путем естественного отбора, когда выживают приспособленные и отмирают неприспособленные к условиям жизнеобитания организмы. В дальнейшем бурное развитие генетики привело к ее синтезу с эволюционным учением, в результате чего возникла так называемая синтетическая теория эволюции. Современная эволюционная биология накопила много новых факторов, не вошедших в синтетическую теорию эволюции. Однако новой концепции эволюции пока не создано.

Основные закономерности биологической эволюции можно сформулировать в обобщенном виде [8, 38]: 1) эволюция происходит с разной скоростью в разные периоды, в настоящее время наблюдается ускоренная эволюция; 2) эволюция организмов разных типов протекает с неодинаковой скоростью, некоторые виды раковин не изменились за 500 млн лет, тогда как за последние несколько сотен тысяч лет появилось и вымерло несколько видов гоминид; 3) новые виды образуются не из наиболее высоко развитых и специализированных форм, а, наоборот, из относительно простых неспециализированных. Например, млекопитающие возникли не из крупных специализированных динозавров, а из группы мелких рептилий; 4) эволюция протекает на уровне популяций (стад, стай), а не отдельных особей.

Эволюционные концепции биологии акцентируют основное внимание на том, как происходит эволюция, тогда как причины эволюции, ее движущие силы остаются в тени. Правда, указывается, что естественный отбор, являющийся в рамках концепций основным фактором эволюции, есть следствие ограниченности пищи и мест обитания. Однако отсутствует последовательный анализ причин естественного отбора (именно поэтому в рамках синтетической теории [38] эволюция считается непредсказуемой, непрогнозируемой, не имеющей конечной цели). Такой анализ, проводимый ниже, оказался возможным благодаря разработке модели эволюции открытых систем с сопряженными процессами.

ЭВОЛЮЦИЯ НООСФЕРЫ

Ноосфера (от греческих *noos* — разум и *sphere* — шар) — область, сфера разумной человеческой деятельности, часть преобразованной человеком биосферы. Основы учения о ноосфере были разработаны В.И. Вернадским [5–7]. Согласно В.И. Вернадскому, в эпоху ноосферы человек становится крупнейшей геологической силой, способной перестраивать биосферу в своих интересах и определять тем самым ее эволюцию.

Геохимическую деятельность человека академик А.Е. Ферсман назвал техногенезом. При техногенезе происходит существенная миграция химических элементов поверхности Земли. Так, в результате горных и строительных работ ежегодно перемещается не менее 1 км^3 горных пород, что соизмеримо с объемом пород, разрушаемых за это время реками [34]. Некоторые процессы техногенеза близки природным, однако в основном они чужды природе и ранее не существовали в ней.

Ноосфера с течением времени усложняется, все более удаляется от равновесия с окружающей средой (литосферой, атмосферой), что связано со все большим усложнением осуществляемых человеком процессов. Основная тенденция эволюции ноосферы имеет прогрессивный характер. Эволюция процесса техногенеза и социальная эволюция тесно связаны и взаимообусловлены. Действительно, в первобытном обществе техногенез был незначительным, в то время как в настоящее время он все более становится главным геохимическим фактором на поверхности Земли.

Почему происходит эволюция ноосферы? При исследовании этого вопроса нельзя не принимать во внимание роль окружающей среды, природного фактора. Действительно, ноосфера относится к открытой системе, обменивающейся веществом и энергией с окружающей средой. Будучи лишена такого обмена, она неизбежно деградирует, а ее структуры разрушаются.

Особо существенное значение имел природный фактор на начальном этапе ноосферы, в первобытном обществе, а также при становлении гоминид. Существующие на этот счет современные представления [33] подтверждают мысль К. Маркса о том, что более суровые природные условия способствовали прогрессивной эволюции человека.

О влиянии природных условий на становление гоминид свидетельствует приуроченность древнейших его ископаемых находок и каменных орудий (возрастом 2 млн лет и более) к определенным областям Земли. Следовательно, зарождение человека происходило не везде, а лишь в наиболее подходящих условиях, в определенной географической среде. Такой средой была рифтовая зона Восточной Африки, характеризующаяся, с одной стороны, достаточно благоприятными для жизни условиями, а с другой — периодическим возникновением критических ситуаций вследствие извержений большего числа имевшихся здесь вулканов [33]. Последние уничтожали растительность, вызывали массовую миграцию животных, обостряли борьбу за существование. В этих условиях ускорялась биологическая эволюция. Благодаря относительной стабильности таких условий в течение миллионов лет критические ситуации многократно повторялись, так что имелся достаточный временной интервал для реализации процесса превращения обезьяны в человека. Этот процесс многократно прерывался и

начинался сызнова, вследствие чего генеалогическое дерево человека содержит много отмерших ветвей.

Становление и развитие классового общества также протекало неравномерно. Темпы прогресса были выше там, где условия среды были не слишком суровые, но и не чрезмерно благоприятные, там, где многократно менялись условия среды жизнеобитания (в первую очередь за счет изменения климата). Это пространства умеренного пояса, Европа, Ближний Восток, где общественное развитие протекало быстрее, чем в Африке и Южной Азии с более благоприятными условиями географической среды. Здесь же в дальнейшем происходило возникновение классовых обществ. Эволюция классовых обществ также была неравномерной, причем ареалы прогресса смещались со временем на север.

Таким образом, эволюция ноосферы зависит от географической среды, она протекает быстрее там, где природные условия не чрезмерно благоприятные и не стационарные (изменяющиеся со временем).

В настоящее время существуют две концепции развития [19, 20, 25–27, 36]: коэволюции (совместной эволюции) природы и общества и перехода биосферы в ноосферу. Первая концепция акцентирует внимание на негативном воздействии человека на природу, вторая — на позитивном. Имеются разные точки зрения и в связи с концепцией перехода биосферы в ноосферу. Ряд авторов, опираясь на теорию В.И. Вернадского, считают, что ноосфера еще не сформировалась. Поэтому предлагаются другие термины для современного состояния части биосферы, преобразованной человеком: социосфера, антропосфера, техносфера и др. Наоборот, другие авторы полагают, что ноосфера уже образована.

В связи с развиваемой концепцией эволюции существенно то, что человеческое общество сопряжено с природой и может функционировать лишь на ее основе. Появление человека и развитие общества означало возникновение на основе биологической новой социальной формы движения материи, сопряженной с первой. Система, в которой социальная форма движения материи доминирует, реальна, существует. Другой вопрос; как эту систему назвать? Представляется, что использование термина "ноосфера" для этой системы вполне оправданно.

ЧТО ИЗВЕСТНО И ЧТО НЕ ИЗВЕСТНО ОБ ЭВОЛЮЦИИ

Попробуем кратко обобщить приведенные данные об эволюции. Эволюция как в неживой, так и в живой природе носит прогрессивный характер, происходит по пути усложнения (дифференциации, специализации, концентрации) структуры объектов. Эволюция протекает неравномерно, в некоторые периоды она протекает быстро, в другие — медленно. Общая тенденция — ускорение эволюции со временем. Эволюция происходит не на уровне отдельных индивидов, а их сообществ. Геологическая эволюция происходит по пути все большей дифференциации вещества, возникновения и все большего распространения минеральных образований с более высокой степенью концентрации элементов. Биологическая эволюция происходит по пути улучшения приспособляемости объектов к среде жизнеобитания. Ноосфера эволюционирует по пути все большего усложнения своей структуры, процессов, осуществляемых человеком. Биологи-

ческая эволюция реализуется на основе естественного отбора, социальная — путем классово́й борьбы (в эксплуататорских обществах). Эволюция зависит как от внутренних факторов (структуры систем), так и от внешних условий существования систем.

Вот главное, что известно о прогрессивной эволюции. Что же о ней неизвестно? Перечислим лишь некоторые вопросы, на которые в современной науке об эволюции не всегда имеются достаточно ясные ответы, или же они есть, но, с точки зрения автора, не достаточно удовлетворительны.

Каковы движущие силы эволюции? В чем ее причины? Каким способом, на основе какого механизма реализуется эволюция в неживой природе? В чем причина замечательного сходства эволюции в неживой и живой природе? В чем специфичность живой природы и ее эволюции? Как объяснить кажущееся противоречие между фактами прогрессивной эволюции на Земле и вторым началом термодинамики (согласно которому самопроизвольными являются лишь процессы рассеяния вещества и энергии, разрушения структур, т.е. регрессивно эволюционирующие процессы)? Почему эволюция протекает неравномерно? Существует ли связь между внешними и внутренними факторами эволюции?

В настоящее время еще не создана количественная теория эволюции, в рамках которой можно получить ответы на поставленные вопросы. При построении такой теории с неизбежностью возникнет вопрос о том, какие системы относятся к прогрессивно эволюционирующим, в чем сущность прогрессивной эволюции, каков ее количественный критерий.

Ниже предпринята попытка разработать модель эволюции открытых систем с сопряженными процессами, в рамках которой удастся найти непротиворечивые ответы на поставленные вопросы.

Г Л А В А 2

СОПРЯЖЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ НА ПОДВИЖНОМ ГЕОХИМИЧЕСКОМ БАРЬЕРЕ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ

Прогрессивная эволюция открытых систем Земли реализуется благодаря сопряжению процессов, при котором один из них (основной, самопроизвольный) может протекать в отсутствие другого; тогда этот другой (сопряженный, несамостоятельный) осуществляется лишь при наличии основного процесса.

Ярким примером природного сопряженного процесса является минералообразование (процесс образования природных химических соединений — минералов) на подвижном геохимическом барьере. Геохимический барьер — это зона, в которой физико-химические параметры (температура, давление, кислотность и т.п.) природных систем резко меняются. Это обуславливает уменьшение миграции химических элементов и, как следствие, их концентрирование в горной породе [11, 34]. Например, температурный геохимический барьер есть не что иное, как область, где

температура (T) горных пород резко уменьшается (т.е. имеется градиент температуры $|\text{grad } T| > 0$). Вследствие этого растворенные вещества, растворимость которых падает с уменьшением температуры, осаждаются в этой области. Подвижный температурный барьер соответствует случаю, когда в горных породах имеется подвижный градиент температуры.

В данной главе обсуждаются наиболее характерные случаи минералообразования на подвижных барьерах (температурном, щелочном, восстановительном) и эволюция этих процессов.

ПРОТИВОРЕЧИТ ЛИ ЭВОЛЮЦИЯ ВТОРОМУ НАЧАЛУ ТЕРМОДИНАМИКИ?

Второе начало термодинамики указывает направление физических и химических процессов в изолированной системе, не обменивающейся энергией и веществом с окружающей средой. Процессы могут быть самопроизвольными, которые в изолированной системе протекают сами собой, и несамопроизвольными, которые не могут течь сами собой. Простейшая формулировка второго начала термодинамики, как обобщение опытных данных применительно к физическому процессу передачи тепла, представляется постулатом Клаузиуса: теплота не может переходить сама собой от холодного тела к теплomu.

Таким образом, переход тепла от холодного тела к теплomu в изолированной системе является несамопроизвольным процессом, и наоборот, от теплого к холодному — самопроизвольным. Это не означает, однако, что несамопроизвольный процесс передачи тепла от холодного к теплomu телу не может быть осуществлен. Он реализуется, например, в холодильнике, но за счет энергии других процессов.

Второе начало термодинамики обобщается на разные физические и химические процессы путем введения особой функции состояния изолированной системы¹ — энтропии. В обобщенной формулировке оно устанавливает, что энтропия изолированной системы стремится к максимуму. Это происходит потому, что энтропия при самопроизвольных процессах возрастает; когда же все самопроизвольные процессы завершены, она достигает максимального значения.

Применительно к переносу вещества за счет теплового движения частиц — диффузии — второе начало термодинамики показывает, что самопроизвольным (с увеличением энтропии) является процесс выравнивания концентраций веществ в изолированной системе. Если в системе имеется несколько веществ, причем их содержание (концентрация) в разных частях системы неодинаково, то возникают направленные диффузионные потоки веществ, стремящиеся выровнять концентрации. Система посредством диффузии приходит в состояние термодинамического равновесия (с максимальной энтропией), при котором концентрация веществ в любой части системы одинакова.

Когда концентрация веществ в разных частях системы неодинакова, то можно сказать, что в распределении веществ в системе имеется определенный "порядок" (закрывающийся, например, в том, что в определен-

¹ Функция состояния — величина, характеризующая состояние системы, ее изменение при переходе системы из одного состояния в другое, зависит только от начального и конечного состояний системы и не зависит от способа (пути) перехода [16].

ной части системы какое-то вещество есть, а в другой оно отсутствует). Диффузия переводит систему в состояние, соответствующее максимально неупорядоченному распределению веществ, т.е. равенству их концентраций во всех частях системы. Следовательно, самопроизвольные процессы массопереноса приводят к уменьшению упорядоченности в изолированной системе.

Аналогичным образом, при самопроизвольных процессах переноса тепла происходит выравнивание температуры различных частей системы, что приводит к рассеянию тепловой энергии, ее обесцениванию. Действительно, если температура в разных частях системы одинакова, то уже нельзя построить тепловую машину, которая преобразовывала бы тепловую энергию в полезную работу. Поэтому В. Томсон формулировал второе начало термодинамики на основе принципа рассеяния энергии: энергия изолированной системы постепенно обесценивается и рассеивается.

Таким образом, из второго начала термодинамики следует, что в результате самопроизвольных процессов изолированная система регрессирует, в итоге наступает ее "тепловая смерть". При этом температура и концентрация веществ во всех частях системы одинаковы, а за счет тепловой энергии уже не может совершаться полезная работа.

Противоречит ли это фактам прогрессивной эволюции в неживой и живой природе на Земле, которую в ряде случаев (при рассмотрении эволюции эндогенных процессов) с определенным приближением можно рассматривать как изолированную систему?¹ Отнюдь нет. Как уже указывалось, термодинамика не отрицает возможность протекания несамопроизвольных процессов. Но если самопроизвольные, основные (положительные, по Клаузиусу) процессы протекают сами собой, т.е. в единственном числе (как, например, передача тепла от теплого к холодному телу), то несамопроизвольные, сопряженные (отрицательные) — лишь на фоне самопроизвольных. Последние, по существу, выступают в роли источника энергии, необходимой для развития несамопроизвольного процесса. Так, в любой тепловой машине имеется, по сути, сопряжение двух процессов: несамопроизвольного превращения теплоты в механическую работу и самопроизвольного перехода теплоты от теплого тела (нагревателя) к холодному (холодильнику). А за счет механической работы можно создавать все более "сложные" упорядоченные системы.

Прогрессивная эволюция определенных систем в неживой и живой природе (гл. 1) и есть следствие того, что тепло остывающей Земли (и Солнца) не все рассеивается "даром", а частично производит определенную "полезную" работу. В результате функционирования природных тепловых машин формируются системы (уже открытые по отношению к мегасистеме Земли, т.е. обменивающиеся с ней энергией и веществом), характеризующиеся большим "порядком", чем окружающая среда, неравновесные по отношению к ней и, можно сказать, находящиеся на более высоком уровне организации вещества. Естественно, такие природные тепловые машины или другие будут функционировать лишь до тех пор, пока Земля и Солнце полностью не остынут, до тех пор будет происходить и прогрессивная эволюция открытых систем Земли.

¹ При рассмотрении эволюции экзогенных процессов в качестве изолированной следует рассматривать систему Земля—Солнце.

СОПРЯЖЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ НА ПОДВИЖНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ БАРЬЕРЕ

Рассмотрим следующую модель процесса. Нагретый ненасыщенный раствор концентрации C_0 движется в холодной пористой среде (горные породы) в направлении, принятом за ось x , с постоянной скоростью u . Начальная температура θ_0 среды меньше исходной температуры раствора T_0 . Тогда на переднем фронте движущегося раствора происходит его охлаждение. В результате растворенное вещество начинает осаждаться на фронте фильтруемого раствора. В системе формируется температурный барьер, который перемещается вместе с потоком.

Поскольку исходный раствор ненасыщенный, то сопряженный процесс отложения растворенного вещества (минералообразования) не может протекать без основного процесса охлаждения фильтрующегося раствора (конвективной теплопроводности).

Образующийся на температурном барьере осадок растворяется при поступлении в зоне минерализации исходного ненасыщенного раствора. Благодаря непрерывно протекающим в потоке процессам отложения—растворения происходит концентрирование вещества в растворе в зоне минерализации (рис. 1). Процесс концентрирования — несамопроизвольный, для его реализации надо затратить работу. Эта работа осуществляется благодаря охлаждению фильтрующегося раствора. Фактически мы имеем дело с природной тепловой машиной, в которой совершается работа концентрирования растворенного вещества за счет тепловой энергии раствора.

Чтобы лучше понять физическую сущность происходящих явлений (что имеет принципиальное значение для всех последующих построений), рассмотрим более детально процессы тепломассопереноса.

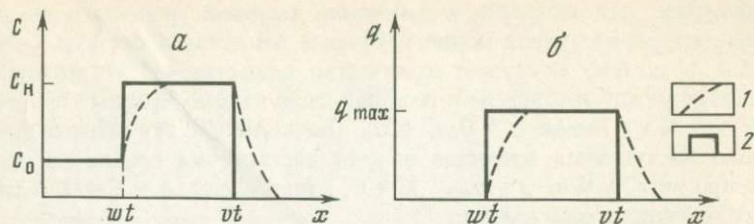
Найдем скорость v , с которой перемещается по направлению фильтрации (x) фронт теплового взаимодействия раствора с породой (на котором температура изменяется от исходной температуры раствора T_0 до начальной температуры горных пород θ_0 (рис. 2)), играющий роль подвижного температурного барьера. За время t в область фильтрации $x > 0$ поступит с раствором количество тепла $\kappa c_{ж} \rho_{ж} S T t$ (S — площадь сечения потока; κ — пористость горных пород; $c_{ж}$, $c_{п}$ — удельные теплоемкости жидкости и пород; $\rho_{ж}$, $\rho_{п}$ — их плотности). Это тепло распределяется в области $0 < x \leq vt$ между раствором, занимающим объем $\kappa v S t$, и горной породой объемом $(1 - \kappa) v S t$. В результате имеем следующее уравнение баланса (сохранения) тепла:

$$\kappa c_{ж} \rho_{ж} S T t = \kappa v c_{ж} \rho_{ж} S T t + (1 - \kappa) v c_{п} \rho_{п} S T t. \quad (2.1)$$

Отсюда получаем уравнение для скорости движения температурного геохимического барьера:

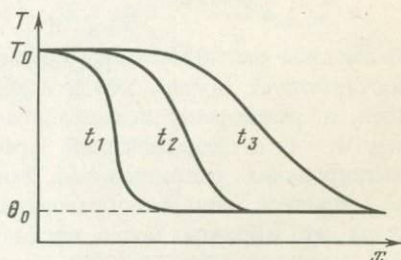
$$v = \frac{u}{1 + (1 - \kappa) \rho_{п} c_{п} / (\kappa \rho_{ж} c_{ж})}. \quad (2.2)$$

Принципиальное значение имеет то, что геохимический барьер подвижен, а его скорость всегда меньше скорости потока ($v < u$). Именно поэтому в движущемся со скоростью u растворе происходят последо-



Р и с. 1. Распределение по оси x концентраций компонента в растворе (а) и горной породе (б) при осаждении из первоначально ненасыщенного раствора

Кристаллизация и растворение протекают: 1 – с конечной скоростью, 2 – мгновенно



Р и с. 2. Распределение температуры в подвижной фазе по оси x для разных моментов времени (t_1, t_2, t_3)

важно процессы осаждения (при $t < x/v$) и растворения вещества. Если же геохимический барьер неподвижен, то растворение осадка не происходит и явление сопряженного концентрирования растворенного вещества не имеет места.

Детальное рассмотрение массопереноса в данном процессе [11] дает следующее распределение концентраций (в грамм-молях на см^3 объема горных пород) вещества в системе (см. рис. 1). В горной породе концентрация (q) возрастает от нуля (при $x = wt$, w – скорость перемещения по x зоны полного растворения осадка) до q_{\max} (при $x = vt$), а затем падает до нуля. Соответственно в растворе концентрация (C) возрастает от C_0 до $C_{\text{н}}$ (C_0 и $C_{\text{н}}$ – концентрация исходного и насыщенного раствора), а затем тоже падает. Нарастание и падение концентрации происходит тем резче, чем больше скорости процессов растворения и осаждения. Если они достаточно велики, то зона минерализации представляет собой движущуюся полосу ($wt < x \leq vt$) с резкими границами, в которой $q = q_{\max}$, $C = C_{\text{н}}$.

Для нахождения концентрации q_{\max} рассмотрим баланс вещества на передней границе ($x = vt$) зоны осадка с резкими границами. За время dt в область $x > vt$ поступает количество растворенного вещества ($uC_{\text{н}}Sdt$), и оно распределяется в объеме ($Svdt$) между раствором и осадком. В силу закона сохранения массы имеем:

$$uC_{\text{н}}Sdt = v(q_{\max} + C_{\text{н}}) Sdt, \quad (2.3)$$

откуда находим:

$$q_{\max} = (u/v - 1)C_{\text{н}}. \quad (2.4)$$

Выражение для скорости w движения тьловой границы зоны осадка находим из рассмотрения полного баланса вещества в системе $x > 0$. За время t в систему поступает количество вещества uC_0St , которое распределится между раствором и породой следующим образом (см. рис. 1): при $0 < x \leq wt$ имеем $q = 0$, $C = C_0$ (поскольку в эту область дополнительного поступления вещества за счет растворения осадка не происходит); при $wt < x \leq vt$ $q = q_{\max}$, $C = C_H$; при $x > vt$, $q = C = 0$. В силу закона сохранения массы имеем:

$$uC_0St = wC_0St + (q_{\max} + C_H)(u - w)St, \quad (2.5)$$

откуда получаем

$$w = \frac{uv(C_H - C_0)}{uC_H + vC_0} \approx v \left(1 - \frac{C_0}{C_H} \right) \quad (2.6)$$

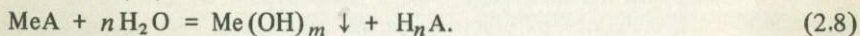
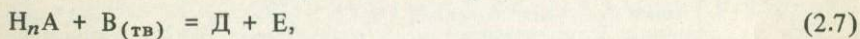
(приближенное равенство справедливо при $vC_0/uC_H \ll 1$). Если $C_0 = C_H$, что соответствует случаю, когда исходный раствор (в источнике $x = 0$) насыщен, то растворение осажденного при $x > 0$ вещества не происходит, поэтому $w = 0$, и геохимический барьер неподвижен. Здесь сопряженного концентрирования растворенного вещества не происходит (поскольку $C_0 = C_H$), процесс минералообразования самопроизвольный.

Каким же образом более наглядно представить функционирование системы минералообразования? Основной процесс конвективной теплопроводности, по существу, создает в потоке подвижную полупроницаемую перегородку, беспрепятственно пропускающую растворитель и задерживающую растворенное вещество. Подвод же растворенного вещества к перегородке осуществляется за счет перепада давления в жидкости (благодаря разности уровней жидкости в источнике и приемнике).

СОПРЯЖЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ НА ПОДВИЖНОМ ЩЕЛОЧНОМ БАРЬЕРЕ

Рассмотрим аналогичную модель процесса. Кислый раствор, содержащий растворенное вещество MeA , фильтруется через горные породы (по направлению оси x со скоростью u). На подвижном фронте химического взаимодействия кислоты с породой возрастает щелочность раствора и происходит гидролиз MeA с образованием основания или основной соли, выпадающих в осадок. Фронт кислотного выщелачивания породы играет роль подвижного щелочного барьера, на котором осаждаются Me .

Процесс для одного из случаев можно представить схемой



Здесь H_nA — кислота; B — выщелачиваемый минерал горной породы; D, E — растворимые продукты реакции выщелачивания; n — целое число (обычно $n = 2, 3$).

Когда исходный раствор MeA ненасыщенный, то сопряженная реакция гидролиза не может протекать без основной реакции кислотного выщелачивания. Роль основной реакции сводится к непрерывному смещению

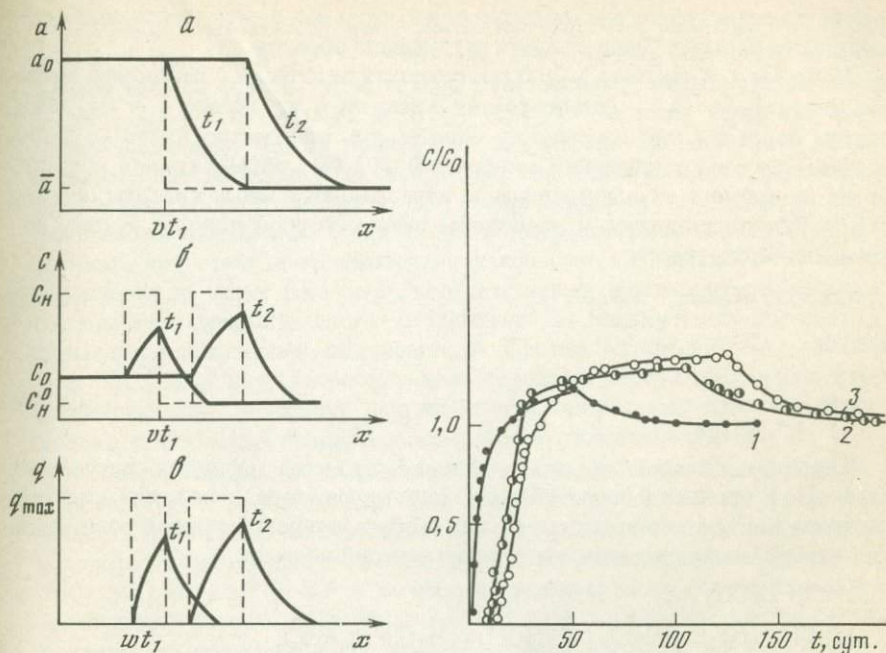


Рис. 3. Распределение по направлению фильтрации (ось x) концентраций кислоты a (а), Me в жидком C (б) и твердом q (в) состояниях для двух моментов времени: t_1 и t_2 ($t_2 > t_1$) (пунктиром показан случай, когда химические реакции протекают мгновенно)

a_0, C_0 — концентрация кислоты и MeA в источнике; \bar{a}, C_{H}^0 — в исходном поровом растворе, равновесном с неизменной горной породой (в частном случае $\bar{a} = C_{\text{H}}^0 = 0$), C_{H} — концентрация MeA в насыщенном растворе; q_{max} — максимальная концентрация Me в породе; v — скорость перемещения по оси x щелочного барьера; w — скорость перемещения тыловой границы зоны минерализации

Рис. 4. Выходные кривые по меди колонок, заполненных смесью 2%-ного реагента (CaCO_3) и 98%-ного инертного носителя (кварцевого песка), длиной 48 (кривая 1), 80 (2) и 100 (3) см

Скорость фильтрации 70 мл/сут, размер зерен 1–3 мм, концентрация CuCl_2 C_0 0,18 N, кислотность раствора pH 1,3

равновесия сопряженной реакции вправо за счет расходования в первой кислоты.

Осадок, образующийся на щелочном барьере, растворяется при поступлении в зону минерализации кислотного раствора (вторая реакция протекает в обратном направлении). Благодаря непрерывно протекающим в потоке процесс отложения–растворения происходит несамопроизвольный процесс концентрирования Me в растворе в зоне минерализации. Фактически мы имеем дело с природной "химической" машиной, в которой совершается работа концентрирования растворенного вещества за счет энергии основной химической реакции.

Процессы массопереноса (рис. 3) протекают здесь аналогично рассмотренному выше случаю температурного барьера. Уравнения для q_{max}

и w остаются в силе с той лишь разницей, что в них v — скорость движения щелочного барьера. Она находится следующим образом.

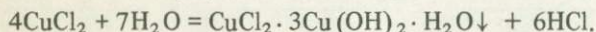
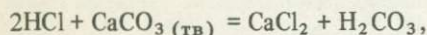
За время t в систему $x > 0$ поступает из источника с раствором масса кислоты ua_0St (a_0 — концентрация кислоты в источнике $x = 0$). Обозначим через m_0 кислотоемкость породы, т.е. количество кислоты, необходимое для выщелачивания минерала В из 1 см³ объема горной породы. Тогда за время t на выщелачивание израсходуется масса кислоты vm_0St , vC_0St будет находиться в свободном объеме горной породы. В силу сохранения массы имеем

$$ua_0St = vC_0St + vm_0St, \quad (2.9)$$

откуда

$$v = \frac{u}{1 + m_0/a_0}. \quad (2.10)$$

Экспериментальной моделью данного процесса является изученный нами [11] процесс взаимодействия фильтрующегося в колонке кислого раствора CuCl_2 с карбонатом кальция с образованием основной соли меди (в природе — минерал атакамит), протекающий по схеме



В частности, при измерении концентрации меди на выходе колонки (выходных кривых колонок) установлено, что она в определенной области превышает концентрацию на входе (рис. 4). Это свидетельствует о концентрировании меди на подвижном щелочном барьере. Аналогичные явления наблюдались нами и при изучении выщелачивания урана из руды разными растворителями.

СОПРЯЖЕННЫЙ ПРОЦЕСС РУДООБРАЗОВАНИЯ НА ПОДВИЖНОМ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ БАРЬЕРЕ

Наиболее ярким примером минералообразования на подвижном геохимическом (восстановительном) барьере является процесс формирования экзогенных инфильтрационных месторождений урана, связанных с зонами пластового окисления [1]. Многие из этих месторождений формируются и в настоящее время, что позволяет всесторонне исследовать данный процесс.

Геологически и геохимически месторождения данного типа изучены достаточно полно. При этом установлено, что формирование экзогенных месторождений урана происходит путем сопряженного концентрирования рудного компонента в растворе и в горной породе (сопряженного минералообразования) из весьма разбавленных растворов.

В проницаемые горизонты артезианских бассейнов, сложенные сероцветными отложениями с углистым органическим веществом и минералами закисного железа, из области питания поступают (инфильтруются) кислородные подземные воды, характеризующиеся высокими положительными значениями окислительно-восстановительного потенциала ($+600 \div +200$ мВ) и содержанием урана, мигрирующего в б-валентной фор-

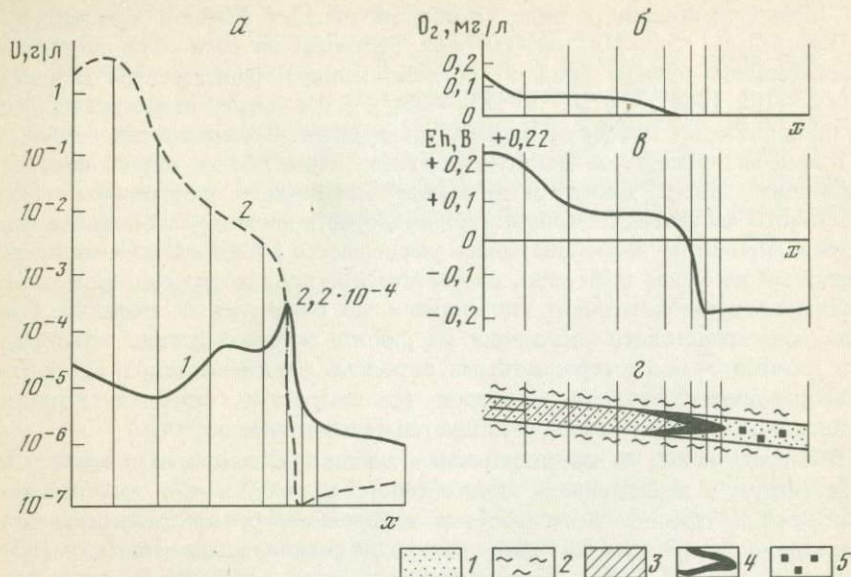
ме (преимущественно в виде уранилкарбонатных анионов $UO_2(CO_3)_2^{-2}$ и $UO_2(CO_3)_3^{-4}$), $3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$ г/л. Растворы на несколько порядков недонасыщены ураном (рис. 5) по отношению к равновесным твердым фазам $(UO_2)(OH)_2 \cdot nH_2O$ и $UO_2-UO_{2,25}$. По мере продвижения вод по проницаемому пласту происходит разрушение органического вещества и замещение минералов закисного железа (таких, как пирит, сидерит, глауконит, хлорит, биотит и др.) гидроокислами — формируется зона пластового окисления. Количество воднорастворенного свободного кислорода при этом последовательно уменьшается от целых мг/л на входе в систему до менее 0,01 мг/л, соответственно происходит снижение окислительно-восстановительного потенциала до близулевых значений. Граница зоны пластового окисления на фронте взаимодействия кислородных пластовых вод с сероцветными породами перемещается со временем в направлении движения растворов (со скоростью, меньшей скорости потока, поскольку кислород расходуется на окисление пород).

Непосредственно за выклиниванием зоны пластового окисления, где присутствует в необходимом количестве ($C_{орг} = 0,0n - n\%$) органическое вещество, в связи с деятельностью анаэробных—сульфатредуцирующих и водородообразующих бактерий происходит резкое падение Eh (до $-(50-250)$ мВ) при pH 7–8,3 — возникает подвижной восстановительный геохимический барьер. Воды оказываются пересыщенными шестивалентным ураном, что приводит к его восстановлению и осаждению в виде окислов UO_{2+x} или минерала коффинита $USiO_4$. Пластовые воды, фильтрующиеся ниже восстановительного барьера, характеризуются отсутствием аналитически определяемого кислорода и практически не содержат урана (обычно $C = n \cdot 10^{-7}$ г/л).

Таким путем в изначально безрудной проницаемой толще возникают промышленные концентрации урана. Вместе с ураном, но в несколько более тыловой части профиля эпигенетических изменений происходит восстановление селена (мигрирующего в виде селенит-иона SeO_3^{-2} и осаждающегося в форме самородного Se или минерала ферроселита $FeSe_2$), а в более передовой зоне — иногда молибдена (мигрирует в виде молибдат-иона MoO_4^{-2} , в осадке находится в виде минерала иордизита MoS_2 или его железосодержащей разновидности — фемолита).

Рудная зона имеет в разрезе морфологию удлинненно-серповидного тела — ролла, отражающего конфигурацию восстановительного геохимического барьера (см. рис. 5). В плане она обладает лентообразной формой, окаймляющей поля развития пластово-окисленных пород.

На изученных радиогидрогеологических профилях, отражающих современное состояние рудообразующей системы, отмечается возрастание концентрации урана в пластовых водах непосредственно перед восстановительным барьером (до $n \cdot 10^{-4} - n \cdot 10^{-3}$ г/л, см. рис. 5) за счет его выщелачивания из пограничных участков рудной зоны, сформировавшейся за предшествующий отрезок времени. Это происходит потому, что исходный раствор далек от насыщения по урану. Поэтому осаденный на барьере уран вновь растворяется при поступлении на барьер (движущийся со скоростью меньшей скорости потока) с потоком ненасыщенного по урану окислительного раствора. В результате многократно повторяющихся на подвижном барьере процессов отложения—растворения



Р и с. 5. Типичный гидрохимический разрез рудной залежи на пластово-инфильтрационном месторождении (з) с данными содержаний в водах кислорода (б) и урана (а) (кривые: 1 – замеренные содержания; 2 – расчетные, равновесные с твердыми фазами $\text{UO}_2\text{--UO}_{2,25}$) и значениями окислительно-восстановительного потенциала Eh (в)

1 – песчаные породы; 2 – глинистые породы; 3 – зона пластового окисления; 4 – урановое оруденение; 5 – неокисленные безрудные породы

концентрация урана на барьере (как в растворе, так и в породе) непрерывно растет со временем.

Таким образом, по мере развития пластово-инфильтрационного процесса происходит перемещение рудных залежей с разрушением их тыловых частей и наращиванием передовых, сопровождаемое последовательным увеличением общих масштабов оруденения и содержания полезного компонента в рудах.

Такова качественно сущность процесса рудообразования, установленная на основе геологических исследований [1]. Естественно, геологические методы позволяли наблюдать лишь результаты протекания весьма длительного (миллионы лет) процесса, сам же процесс, его динамика (т.е. развитие процесса в пространстве и во времени) могут быть исследованы лишь методами математического и физического моделирования. Такие исследования и были предприняты нами, они основываются на математической модели концентрирования вещества на подвижных геохимических барьерах [11].

На основе развитой нами теории пластово-окислительного процесса [11] количественно охарактеризована морфология восстановительного барьера и рассчитаны скорости его движения. Поскольку на подвижной барьер поступает ненасыщенный по урану раствор, с неизбежностью происходит концентрирование растворенного урана на этом барьере. Это в действительности и наблюдается, о чем свидетельствует современное

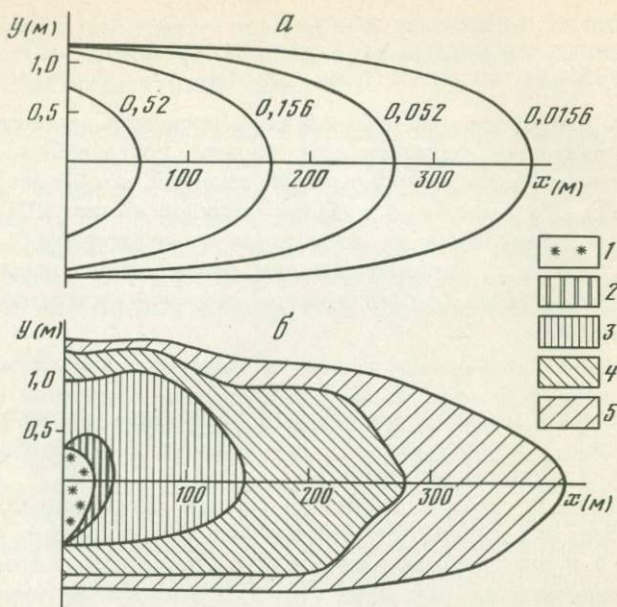


Рис. 6. Рассчитанные линии изоконцентраций металла в пласте мощностью 2l (а) и наблюдаемые распределения металла в мешковой части рудного ролла (б)

Цифры у кривых показывают значение относительной концентрации (q/q_{\max}) на данной линии

1 — пластово-окисленные породы; 2–5 — руды с относительной концентрацией металла: 2 — 1–0,52; 3 — 0,52–0,156, 4 — 0,156–0,052, 5 — 0,052–0,0156

распределение концентрации урана в растворе вблизи восстановительного барьера (см. рис. 5).

Количественное рассмотрение динамики формирования пластово-фильтрационных месторождений [11] позволяет рассчитать время, необходимое для наблюдаемого концентрирования (первые миллионы лет), константу скорости процесса и теоретически охарактеризовать распределение содержания урана в конкретных рудных телах (рис. 6). Роллообразная форма рудных залежей с выклиниванием крыльев в сторону усиления окислительной обстановки обусловлена поперечной диффузией урана в слабопроницаемые породы подошвы и кровли водоносного пласта.

Охарактеризованный выше процесс рудообразования явился "природной лабораторией", в которой удалось проверить теоретические построения, касающиеся сопряженных процессов минералообразования на подвижном геохимическом барьере [11]. Согласие теории с наблюдениями позволяет считать обоснованной "опытом" используемую в данной работе концепцию сопряженных геохимических процессов.

**КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ
СОПРЯЖЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ
НА ПОДВИЖНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ БАРЬЕРЕ**

Как показано выше, при сопряженных процессах минералообразования на подвижном геохимическом барьере совершается "полезная" работа концентрирования растворенного вещества за счет энергии основного процесса. По аналогии с тепловой машиной введем КПД сопряженного минералообразования на подвижном температурном барьере как отношение работы A концентрирования растворенного вещества к общему количеству тепла Q , поглощенного системой минералообразования за время процесса:

$$\eta = A/Q. \quad (2.11)$$

КПД показывает, насколько эффективно теплота основного процесса (конвективной теплопроводности) используется в сопряженном (концентрирования растворенного вещества).

Выражение для работы концентрирования растворенного вещества имеет удобный для дальнейшего анализа вид, если допустить, что раствор идеальный, а процесс концентрирования растворенного вещества протекает термодинамически обратимо [16]¹. В этом случае имеем хорошо известное уравнение для работы концентрирования 1 г-моля растворенного вещества (от концентрации C_0 в источнике до C_n в системе) [16]

$$A_0 = RT_0 \ln(C_n/C_0), \quad (2.12)$$

где R — универсальная газовая постоянная; T_0 — температура (К), при которой протекает процесс концентрирования, в данном случае она совпадает с температурой в источнике (см. рис. 2).

За время t концентрируется $C_n(v-w)St$ г-молей растворенного вещества (см. рис. 1), так что работа концентрирования

$$A = C_0 v S t A_0 \quad (2.13)$$

(с учетом значения w по уравнению (2.6)).

Количество тепла Q , поглощенного системой минералообразования за время t , израсходовано на нагревание горных пород в области $0 < x \leq vt$ (от начальной температуры пород θ_0 до температуры T_0 раствора в источнике);

$$Q = (1 - \kappa) \rho_{\Pi} c_{\Pi} v S t (T_0 - \theta_0). \quad (2.14)$$

Подставляя найденные значения A и Q , найдем выражение для КПД минералообразования на подвижном температурном барьере:

$$\eta = \frac{\lambda T_0 C_0}{T_0 - \theta_0} \ln \frac{C_n}{C_0}, \quad \lambda = \frac{R}{(1 - \kappa) \rho_{\Pi} c_{\Pi}}. \quad (2.15)$$

¹ Эти допущения, конечно, являются определенной схематизацией, идеализацией сложного природного процесса. Но такой прием обычен в науке, особенно на первом этапе исследований. Именно поэтому развиваемые в работе представления являются всего лишь упрощенной моделью эволюции.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ
СОПРЯЖЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ
НА ПОДВИЖНОМ ЩЕЛОЧНОМ БАРЬЕРЕ

Ввести КПД сопряженного процесса минералообразования на подвижном щелочном барьере способом, рассмотренным выше для температурного барьера (уравнение (2.11)), не удастся, так как работа сопряженного процесса (2.8) осуществляется не за счет охлаждения раствора, а за счет свободной энергии основной химической реакции (2.7). Действительно, процесс (2.7), (2.8) будет осуществляться вне зависимости от того, идет ли основная реакция (2.7) с выделением или поглощением тепла.

Будем рассматривать процесс в рамках следующих модельных допущений: 1) в системе минералообразования (области развития процесса ($0 < x \leq ut$)) существует равновесие, поэтому область осадка $Me(OH)_n$ представляет собой зону ($wt < x \leq vt$) с резкими границами (см. рис. 3); 2) замещение минерала В на $Me(OH)_n$ происходит в изотермических условиях без изменения объема породы; 3) для характеристики состояния системы минералообразования можно использовать свободную энергию Гельмгольца F . Тогда условием самопроизвольности процесса минералообразования будет уменьшение свободной энергии в процессе $\Delta F < 0$ [16]. Наоборот, если процесс течет сам собой не может, $\Delta F > 0$.

Поскольку неравновесные концентрации MeA , H_nA равны C_0 , \bar{a} , а равновесные — C_H и a_0 (см. рис. 3), то изменение свободной энергии ΔF_0 при образовании 1 г-моля $Me(OH)_n$ по реакции (2.8) (в соответствии с уравнением изотермы химической реакции (2.8) [16]) следующее:

$$\Delta F_0 = RT \left(\ln \frac{\bar{a}}{C_0} - \ln \frac{a_0}{C_H} \right) = RT \left(\ln \frac{C_H}{C_0} - \ln \frac{a_0}{\bar{a}} \right). \quad (2.16)$$

Уравнение (2.16) по существу описывает термодинамическое сопряжение на подвижном щелочном барьере несамопроизвольного процесса концентрирования растворенного вещества с самопроизвольным процессом функционирования щелочного барьера.

Условие сопряжения можно записать в виде¹

$$\Delta F_0 = F'_0 + \Delta F''_0, \quad \Delta F_0 < 0; \quad \Delta F'_0 = RT \ln (C_H/C_0), \quad \Delta F'_0 > 0; \quad (2.17)$$

$$\Delta F''_0 = RT \ln (\bar{a}/a_0), \quad \Delta F''_0 < 0, \quad |\Delta F''_0| > \Delta F'_0.$$

Из (2.17) видно, что величина ΔF_0 , характеризующая сопряженный процесс минералообразования, складывается из двух слагаемых: одного отрицательного ($\Delta F''_0$) и другого положительного ($\Delta F'_0$), характеризующих самопроизвольный процесс функционирования щелочного барьера и несамопроизвольный — концентрирования растворенного вещества.

То, что убыль свободной энергии $\Delta F''_0$ относится к реакции (2.7) формирования щелочного барьера, видно из следующего. Так как в об-

¹Условие (2.17) легко обобщить на произвольную химическую реакцию, которую, таким образом, можно формально рассматривать как результат сопряжения несамопроизвольного процесса концентрирования (сжатия) исходных веществ с самопроизвольным процессом разбавления (расширения) продуктов реакции.

ласти $vt < x \leq ut$ существует равновесие реакции (2.7), то для изменения свободной энергии при образовании 1 г-моля вещества Д(Е) можно записать по аналогии с (2.16):

$$\Delta F_0'' = RT \left(\ln \frac{[Д][Е]}{a_0} - \ln \frac{[Д][Е]}{\bar{a}} \right) = RT \ln \frac{\bar{a}}{a_0}. \quad (2.18)$$

Здесь \bar{a} , a_0 — равновесная и неравновесная по реакции (2.7) концентрации кислоты (см. рис. 3). Для веществ Д и Е неравновесная и равновесная концентрации совпадают (поскольку единственным результатом протекания реакции (2.7) является изменение концентрации H_nA от a_0 до \bar{a}).

Заметим, что величина $\Delta F_0'$ совпадает с величиной свободной энергии для практически не реализуемого случая протекания сопряженной реакции (2.8) в отсутствие основной (2.7). Действительно, для такого мыслимого процесса неравновесные концентрации MeA , H_nA равны C_0 и a_0 (поскольку процесс минералообразования предполагается протекающим из исходного ненасыщенного по MeA раствора), а равновесные — по-прежнему C_H и a_0 . Тогда в соответствии с уравнением изотермы химической реакции (2.8) [16] получим

$$\Delta F_0' = RT \left(\ln \frac{a_0}{C_0} - \ln \frac{a_0}{C_H} \right) = RT \ln \frac{C_H}{C_0}, \quad (2.19)$$

откуда видно, что условие (2.17) следует интерпретировать и как условие сопряжения процесса минералообразования на подвижном щелочном барьере с процессом его функционирования.

Для того чтобы получить 1 г-моль $Me(OH)_n$ на подвижном щелочном барьере, необходимо совершить работу $A_0 = \Delta F_0'$ при обратимом процессе [16]. За время t образуется $q_{\max}(v-w)t$ молей $Me(OH)_n$, поэтому полная работа процесса за время t

$$A = \Delta F' = q_{\max}(v-w) \Delta F_0'. \quad (2.20)$$

За время t выщелачивается по реакции (2.7) q_0vt молей минерала В (q_0 его исходная концентрация в горной породе), следовательно, образуется столько же молей вещества Д. Поэтому полная убыль свободной энергии в результате протекания основной реакции (2.7) за время t

$$\Delta F'' = q_0vt \Delta F_0''. \quad (2.21)$$

Введем КПД сопряженного процесса минералообразования на подвижном щелочном барьере следующим образом:

$$\eta = A / |\Delta F''| = \Delta F' / |\Delta F''|. \quad (2.22)$$

Величина η ($\eta < 1$) показывает, насколько "эффективно" свободная энергия основного процесса функционирования подвижного геохимического барьера "используется" в сопряженном процессе минералообразования.

На основе (2.22) с учетом (2.17), (2.20), (2.21) и значения для

q_{\max} , v , w (по уравнениям (2.4), (2.6), (2.10)) получим выражение для КПД минералообразования на подвижном щелочном барьере:

$$\eta = \frac{C_0 \ln(C_n/C_0)}{a_0 \ln(a_0/\bar{a})}. \quad (2.23)$$

ЭВОЛЮЦИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ НА ПОДВИЖНОМ ГЕОХИМИЧЕСКОМ БАРЬЕРЕ

Система минералообразования на подвижном геохимическом барьере неравновесна по отношению к окружающей среде, поскольку концентрация C_n растворенного вещества в зоне минерализации $wt < x \leq vt$ превышает ее значение в окружающей среде (при $0 < x \leq wt$ $C = C_0$, $C_0 < C_n$, а при $vt < x \leq ut$ $C = C_n^0$, см. рис. 3). Это неравновесие носит динамический характер, при котором процессы растворения формирующего систему вещества (в случае щелочного барьера, $Me(OH)_n$) непрерывно компенсируются его отложением благодаря потреблению энергии основного процесса. При прекращении основного процесса система минералообразования неизбежно "распадется", придет в равновесие с окружающей средой (осадок растворится, концентрации выравняются).

Чем больше степень концентрации растворенного вещества (C_n/C_0), тем более неравновесна система минералообразования относительно окружающей среды, тем более она упорядоченна. Система минералообразования находится и на более высоком уровне организации вещества, поскольку в ней образуется новая фаза — минерал (в случае щелочного барьера — $Me(OH)_n$), отсутствующая в окружающей среде.

Таким образом, благодаря сопряжению процессов в системе минералообразования реализуется несамопроизвольный процесс концентрирования растворенного вещества (с увеличением свободной энергии), который при определенных условиях удаляет систему от равновесия со средой в направлении более высокого уровня организации и дифференциации вещества. Следовательно, система минералообразования с сопряженными процессами относится к эволюционирующей, при определенных условиях она прогрессивно эволюционирует.

Количественной характеристикой эволюции минералообразования является КПД η сопряженного процесса минералообразования, причем чем больше η , тем на более высоком уровне эволюционного развития находится процесс минералообразования. Действительно, чем больше η , тем при меньших затратах $|\Delta F''|$, Q энергии основного процесса функционирует система (с заданным значением $\Delta F'$). При одинаковых энергетических затратах $|\Delta F''|$, Q большим значением η отвечают процессы с большим значением $\Delta F'(A)$, что означает все большее усложнение системы, все большее ее удаление от равновесия с окружающей средой¹.

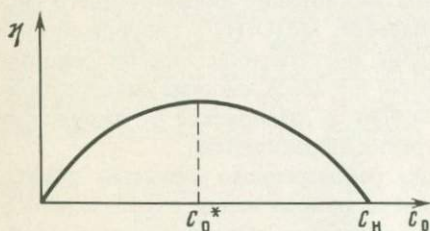
¹ Действительно, величина $\Delta F'$ в уравнении (2.22) совпадает с работой концентрирования растворенного вещества (при обратимом процессе) [16], причем чем концентрированное вещество, тем большая затрачена работа. Но чем концентрированное вещество, тем более упорядочена система, тем более она удалена от равновесия со средой.

Таким образом, при прогрессивной эволюции сопряженного процесса минералообразования КПД растет со временем, что может быть записано в виде условия

$$d\eta/dt > 0. \quad (2.24)$$

При этом увеличивается неравновесность системы минералообразования по отношению к окружающей среде, или растет энергетическая эффективность ее функционирования, или имеет место и то и другое одновременно.

Следует в общем случае различать эволюцию системы и процесса, с которым сопряжена система (в данном случае минералообразующей системы и процесса минералообразования). В качестве критерия прогрессивной эволюции системы можно принять увеличение со временем ее удельной



Р и с. 7. Зависимость КПД (η) минералообразования на подвижном геохимическом барьере от концентрации (C_0) минералообразующего компонента в источнике

свободной энергии ($d\bar{F}'/dt > 0$, $\bar{F}' = \bar{F}'/V$, V – объем системы) [10, 17, 41], отражающей в обобщенном виде усложнение структуры системы. Однако рассчитать абсолютное значение свободной энергии нельзя. Поэтому в качестве такого критерия целесообразно принять рост со временем удельной работы (максимальной) сопряженного процесса ($d\bar{A}/dt > 0$, $\bar{A} = \Delta\bar{F}'$).

Так как $\eta = \bar{A}/\bar{\epsilon} = \bar{A}/\bar{\epsilon}$ ($\bar{\epsilon}$ и $\bar{\epsilon}$ – общее и удельное количество подводимой энергии), то $d\bar{A}/dt = \eta d\bar{\epsilon}/dt + \bar{\epsilon} d\eta/dt$. Откуда видно, что эволюция системы определяется как изменением со временем подводимой удельной энергии ($d\bar{\epsilon}/dt$), так и эволюцией сопряженного процесса ($d\eta/dt$). Если количество подводимой энергии достаточно велико ($\bar{\epsilon} \gg \eta(d\bar{\epsilon}/dt)/(d\eta/dt)$), то критерий эволюции системы и процесса совпадают: $d\bar{A}/dt > 0$, если $d\eta/dt > 0$. Ниже на основе условия (2.24) обсуждается эволюция сопряженных процессов, которая (с учетом вышеизложенного) является определяющей в эволюции соответствующих открытых систем.

Анализ найденных выше зависимостей (2.15), (2.23) от концентрации C_0 формирующего систему компонента Me в источнике показывает, что с ростом C_0 величина η сначала растет (при $0 < C_0 < C_0^*$, $C_0^* = C_n/e$, $e = 2,718\dots$ – число Непера), а затем падает ($C_0^* < C_0 < C_n$) (рис. 7). Следовательно, при определенном изменении со временем концентрации MeA в источнике процесс минералообразования прогрессивно эволюционирует ($d\eta/dt > 0$). При эволюции на фоне роста концентрации MeA происходит увеличение массы системы. Но особый интерес представляет эволю-

ция при уменьшении концентрации MeA в источнике, когда η растет. Система "реагирует" на уменьшение концентрации минералообразующего компонента ($dC_0 < 0$) совершенствованием, эволюцией процесса минералообразования ($d\eta > 0$). Этот случай может быть охарактеризован как устойчивая эволюция, поскольку именно он определяет главную линию эволюции, устойчивую к "неблагоприятным" внешним условиям (уменьшению концентрации формирующего систему компонента в источнике).

Система минералообразования эволюционирует также при изменениях в энергетике основного процесса (за счет изменения температуры T_0 и концентрации a_0 кислоты в источнике в случае температурного и щелочного барьеров соответственно). Однако в силу того, что величина растворимости минерала C_n в уравнениях (2.15), (2.23) сложным образом зависит от T_0 и a_0 соответственно, это затрудняет количественный анализ соответствующих факторов эволюции. Частично этот вопрос обсуждается ниже.

Обобщим полученные результаты. К эволюционирующим относятся системы минералообразования с сопряженными процессами. При прогрессивной эволюции минералообразования возрастает КПД сопряженного процесса. Главный постоянно действующий фактор прогрессивной эволюции — уменьшение концентрации формирующих систему компонентов в источнике.

ГЛАВА 3

МОДЕЛЬ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Как уже указывалось, эволюция ряда минеральных образований в неживой природе происходит по пути все большего удаления со временем природных минеральных объектов (по составу и структуре) от усредненных по земной коре, по пути все большей дифференциации вещества коры во времени.

Объяснение этого может быть получено в рамках единого подхода — на основе модели сопряженного концентрирования рассеянных компонентов горных пород на подвижных геохимических барьерах, которая является распространением и обобщением рассмотренной в предыдущей главе модели сопряженного минералообразования на различные геохимические процессы.

СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ

Любой рудообразующий процесс сводится в конечном счете к концентрированию рассеянных рудных элементов горных пород. Этот процесс — несамостоятельный, для его осуществления надо затратить работу, в результате чего усложняется структура соответствующих геохимических систем, растет степень их упорядоченности. Поэтому рудообразующий

процесс — сопряженный, протекающий на фоне самопроизвольных процессов и обусловленный ими. Последние могут иметь различную природу. Фактически рудообразующая система — некое "устройство", использующее тепловую или химическую энергию для концентрирования рудного вещества.

Рассмотрим обобщенную модель эпигенетического рудообразования (вторичного, наложенного на процессы формирования горных пород) на подвижном геохимическом барьере (для определенности, щелочном), протекающего путем мобилизации рассеянного рудного вещества горных пород. Пусть в область пород $x > 0$, содержащих рудный компонент в рассеянном состоянии (с концентрацией q_0), поступает кислый раствор, фильтрующийся по направлению оси x со скоростью u . Раствор выщелачивает рудные и нерудные компоненты пород, в результате чего он становится рудоносным. На подвижном фронте химического взаимодействия кислоты с породой возрастает щелочность раствора и происходит гидролиз растворенного рудного компонента (Me) с образованием основания или основной соли, выпадающих в осадок. Благодаря непрерывно протекающим на подвижном щелочном барьере процессам выщелачивания—отложения происходят формирование зоны рудной минерализации и концентрация рудного компонента в растворе в этой зоне.

Процесс протекает по рассмотренной ранее схеме минералообразования на подвижном щелочном барьере с той лишь разницей, что первичным источником рудного вещества являются горные породы (а не раствор, поступающий в систему из источника $x = 0$). Можно показать [11, 12], что результат развития данного процесса идентичен рудообразованию путем отложения рудного вещества из раствора с концентрацией рудного компонента (C_0^*), равной

$$C_0^* = C_n q_0 / (q_0 + q_{\max}), \quad (3.1)$$

где q_{\max} — содержание отложенного на барьере Me, определяемое выражением (2.4) (так что общее содержание Me в рудной зоне $q_{\Sigma} = q_0 + q_{\max}$).

Выражение для КПД рудообразования получается при подстановке в (2.23) вместо C_0 величины C_0^* . Перепишем его в несколько ином виде:

$$\eta = \frac{q_0 q_{\max}}{q_0 + q_{\max}} \frac{RT}{|\Delta F^0|} \ln \frac{q_0 + q_{\max}}{q_0} \approx \frac{q_0 RT}{|\Delta F^0|} \ln \frac{q_{\max}}{q_0}, \quad (3.2)$$

где ΔF^0 — удельная (в расчете на 1 см^3 горной породы) свободная энергия процесса формирования геохимического барьера, приближенное равенство в (3.2) справедливо при $q_{\max} \gg q_0$.

Уравнение (3.2) можно рассматривать как обобщенное выражение КПД рудообразования вне зависимости от типа геохимического барьера (поскольку в него не входят специфические характеристики щелочного барьера).

Полученные результаты расшифровывают физический смысл концепции энергии рудообразования, развитой Н.И. Сафроновым [45] на основе упрощенной трактовки процесса как сжатия идеального газа. Энергия рудообразования ϵ_0 (точнее, свободная энергия), по Н.И. Сафро-

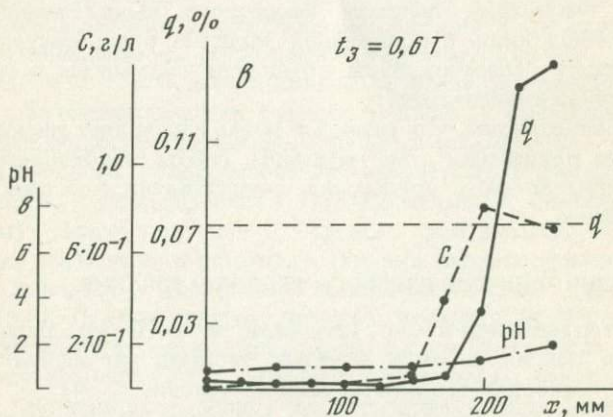
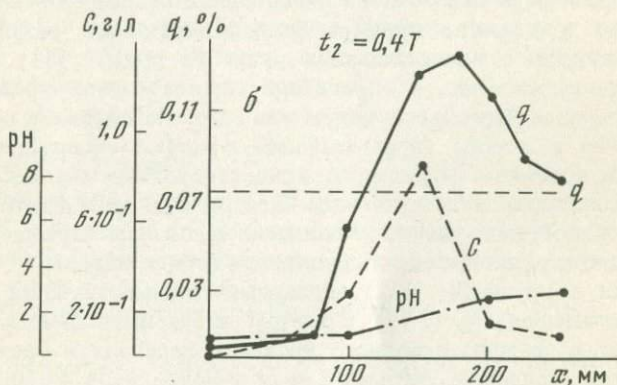
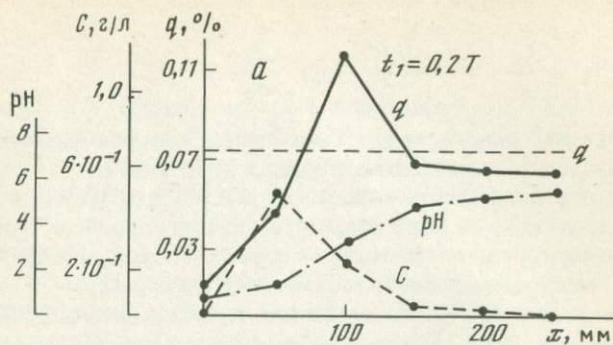


Рис. 8. Распределение концентраций металла в растворе (C), породе (q) и pH растворов по длине колонки (ось x) при выщелачивании серной кислотой песчаной урановой руды (с содержанием 0,072% урана, 0,3% карбонатной двуокиси углерода и 70–75% от общего содержания долей шестивалентного урана) для опытов разной длительности t : для $t_1 = 0,2T$ (а), $t_2 = 0,4T$ (б), $t_3 = 0,6T$ (в)

T — длительность полного выщелачивания руды из колонки длиной 260 мм и диаметром 32 мм. Концентрация кислоты 20 г/л

нову, есть

$$\epsilon_0 = |\Delta F^0| = \frac{\epsilon_{\text{ч}}}{\eta} = \frac{q_0 RT}{\eta} \ln \frac{q_{\text{max}}}{q_0}, \quad (3.3)$$

где $\epsilon_{\text{ч}}$ — "чистая" энергия рудообразования, которая затрачивалась бы на рудообразование в идеальном процессе (при $\eta = 1$).

Энергия рудообразования, введенная Н.И. Сафроновым, и КПД являются термодинамическими характеристиками процесса концентрирования рассеянного рудного вещества горных пород, сопряженного с функционированием подвижного геохимического барьера.

Уравнения (3.2), (3.3) позволяют находить абсолютные значения свободной энергии и КПД рудообразования, если необходимые параметры процесса известны. Последние для палеопроцессов рудообразования могут быть определены на основе экспериментального моделирования.

Рассмотрим в качестве примера экспериментальные результаты по динамике кислотного выщелачивания урана из руды [11]. По мере протекания процесса (рис. 8) происходит переотложение урана на подвижном щелочном барьере, в результате чего наблюдается максимум его содержания в породе (превышающий исходное содержание), который растет со временем. Происходит концентрирование соединений урана и в растворе на подвижном щелочном барьере. При этом фактически моделируется рудообразование на подвижном щелочном барьере в случае, когда источником рудного вещества являются горные породы.

Подставляя в уравнение (3.2) экспериментальные значения q_0 , q_{max} , а также рассчитывая по (2.19) с учетом экспериментальных значений a_0 , \bar{a} свободную энергию основного процесса, переходя к удельной свободной энергии, найдем с учетом (3.3) $\eta \approx 0,06\%$, $\epsilon_{\text{ч}} \approx 4 \cdot 10^{-3}$ Дж/см³, $\epsilon_0 \approx 7$ Дж/см³. Естественно, полученные цифры в первую очередь характеризуют энергетику процесса кислотного выщелачивания руды, который является лишь приближенной моделью рудообразующего процесса (поскольку переотложенный компонент содержится в горной породе уже в рудной концентрации).

В заключение отметим, что развитый подход выявляет энергетическую природу связи оруденения с магматизмом. Работа, необходимая для образования магматогенного оруденения, осуществляется за счет тепловой энергии интрузива.

ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ

Процесс эпигенетического, в том числе эндогенного, рудообразования является сопряженным и поэтому эволюционирующим. Он прогрессивно эволюционирует, если выполняется условие (2.24).

Выведем на основе уравнения (3.2) критерий прогрессивной эволюции эпигенетического рудообразования. Дифференцируя (3.2) по времени, получим (при $|\Delta F_0| = \epsilon_0$, $a = RT$, $q_{\text{max}} \gg q_0$)

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{aq_0}{\epsilon_0 q_{\text{max}}} \frac{dq_{\text{max}}}{dt} + \left(\frac{a}{\epsilon_0} \ln \frac{q_{\text{max}}}{q_0} \right) \frac{dq_0}{dt} -$$

$$- \left(\frac{aq_0}{\epsilon_0^2} \ln \frac{q_{\max}}{q_0} \right) \frac{d\epsilon_0}{dt} . \quad (3.4)$$

Отсюда видно, что условие прогрессивной эволюции (2.24) выполняется лишь при определенном соотношении производных по времени от величин q_{\max} , q_0 и ϵ_0 , характеризующих факторы эволюции.

Наиболее сложным является вопрос интерпретации первого слагаемого в (3.4). В случае минералообразования на подвижном геохимическом барьере величина q_{\max} функционально зависит от физико-химических параметров основного процесса [11]: на температурном — увеличивается с ростом температуры в источнике, на щелочном — увеличивается с ростом концентрации кислоты в источнике и т.п. От температуры же раствора (в случае температурного барьера) и концентрации кислоты (в случае щелочного) в источнике зависит количество поступающей (за время t) в минералообразующие системы энергии ϵ (тепловой, химической), на основе которой совершается работа рудообразования. Поэтому можно принять, что величина q_{\max} зависит от энергии основного процесса, причем с ростом ϵ величина q_{\max} также растет, т.е.

$$q_{\max} = f(\epsilon), \quad dq_{\max}/d\epsilon > 0. \quad (3.5)$$

Уравнение (3.4) с учетом (3.5) показывает возможные варианты реализации прогрессивной эволюции эпигенетического рудообразования при различном характере изменения со временем энергетики основного процесса. Так как $\frac{dq_{\max}}{dt} = \frac{dq_{\max}}{d\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt}$, то при $d\epsilon/dt < 0$ $dq_{\max}/dt < 0$, при $d\epsilon/dt = 0$ $dq_{\max}/dt = 0$, при $d\epsilon/dt > 0$ $dq_{\max}/dt > 0$. Поэтому при прочих равных условиях (например, при $dq_0/dt = 0$) прогрессивная эволюция имеет место: при $d\epsilon/dt < 0$ — лишь в случае существенного уменьшения во времени энергии рудообразования ($d\epsilon_0/dt \ll 0$); при $d\epsilon/dt = 0$ условия на уменьшение ϵ_0 со временем менее жесткие ($d\epsilon_0/dt < 0$); наконец, при $d\epsilon/dt > 0$ прогрессивное развитие в принципе возможно даже при увеличении энергии рудообразования — уменьшении энергетической эффективности сопряженного процесса ($d\epsilon_0/dt \geq 0$).

Для эндогенного рудообразования маловероятно изменение со временем энергии рудообразования (применительно к однотипным месторождениям). Далее, допуская в нулевом приближении, что концентрация рудных элементов в источнике (кларки рудных элементов) существенно не менялась в геологической истории, имеем в (3.4) $d\epsilon_0/dt = dq_0/dt = 0$. Откуда следует, что прогрессивная эволюция эндогенного рудообразования реализуется, когда растет со временем концентрация рудных элементов в однотипных оруденениях, сформировавшихся в разные геологические эпохи, т.е. критерий прогрессивной эволюции

$$dq_{\max}/dt > 0. \quad (3.6)$$

Геологические данные по эволюции эндогенного рудообразования [42, 43, 48] не дают однозначного ответа на вопрос о характере изменения величины q_{\max} со временем. Зачастую отмечается, что многие наиболее крупные рудные месторождения имеют древнейший докембрийский воз-

раст, а со временем масштабы месторождений уменьшаются. Однако развиваемая концепция эволюции связывает прогрессивное развитие с увеличением содержания рудных элементов в месторождениях, а не их масштабов. Если содержание одних и тех же рудных элементов в однотипных месторождениях, сформировавшихся в разное геологическое время, не менялось, то о прогрессивной эволюции эндогенного рудообразования говорить не приходится (применительно к данному типу месторождений). Вывод же о прогрессивном развитии эндогенного рудообразования в целом (который можно сделать на основе изучения структуры и состава месторождений, образовавшихся в разное время, безотносительно к их типу [42, 43]) не противоречит развитому подходу. Но количественный критерий эволюции эндогенного рудообразования в целом уже не сводится к условию (3.6), а требует рассмотрения выполнимости условия прогрессивной эволюции (2.24) применительно к процессу концентрирования смеси веществ.

ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЛИТОСФЕРЫ

Эволюция литосферы имеет прогрессивный характер, поскольку, как показано рядом геологов (см. гл. 1), она происходит по пути все большей дифференциации вещества, возникновения и все большего распространения минеральных образований с более высокой степенью концентрации элементов. Следовательно, в литосфере на фоне генерального основного процесса — остывания Земли — протекают сопряженные процессы перераспределения и концентрирования рассеянного вещества верхней мантии и земной коры.

Такие процессы реализуются, в частности, на подвижных геохимических барьерах, возникающих при фильтрации мантийных флюидов из глубин Земли. Механизм действия геохимических барьеров уже рассматривался. При поступлении в относительно холодные породы нагретого раствора (случай температурного барьера) будут протекать процессы растворения (выщелачивания) компонентов пород, относительно которых флюид недосыщен и растворимость которых возрастает с температурой. При дальнейшем движении раствора, уже насыщенного относительно выщелачиваемых компонентов, в область более низких температур он становится пересыщенным, данные компоненты осаждаются, а затем снова растворяются при поступлении нагретого ненасыщенного раствора. В результате многократно повторяющихся на подвижном барьере процессов растворения—осаждения происходит перераспределение и концентрирование рассеянного вещества верхней мантии и земной коры.

Рассмотрим возможные факторы прогрессивной эволюции литосферы, происходящей при выполнении условия (2.24). Сопоставим приблизительно величину ϵ в (3.3) с количеством тепла, затрачиваемого потоком мантийных флюидов на нагревание 1 см^3 горных пород от исходной температуры пород θ_0 до температуры T_0 ($T_0 > \theta_0$), эндогенного источника флюидов (как это фактически делается в (2.11), (2.15)):

$$\epsilon = (1 - \kappa) \rho_{\Pi} c_{\Pi} (T_0 - \theta_0). \quad (3.7)$$

Тогда получим (ср. с (2.15))

$$\eta = \frac{\lambda T_0 q_0}{T_0 - \theta_0} \ln \frac{q_{\max}}{q_0}, \quad \lambda = \frac{R}{(1-\kappa) \rho_{\Pi} c_{\Pi}}. \quad (3.8)$$

В рамках сформулированной модели прогрессивная эволюция литосферы происходит в периоды функционирования подвижных геохимических барьеров, т.е. в существенно нестационарные периоды энергетической эволюции Земли. Они могут быть сопоставлены с эпохами тектономагматической активизации и интенсивного вулканизма. В эти эпохи происходит повышение сейсмичности земной коры, увеличение интенсивности магматических и вулканических процессов, крупномасштабные преобразования структуры и минерального состава горных пород (региональный метаморфизм), связанные с разогревом верхней мантии Земли и частичным плавлением ее вещества. Тогда величину T_0 , входящую в (3.8), можно условно сопоставить с температурой эндогенного источника, функционировавшего в эти эпохи.

Поскольку характер изменения температуры от одной эпохи активизации к другой неясен (возможно, T_0 не менялась), то на основе (2.24), (3.8) не удастся однозначно судить об эволюции литосферы. Однако в каждую из эпох активизации процессы прогрессивного развития имели место. Налагаясь один на другой, они могли обусловить определенную прогрессивную тенденцию эволюции литосферы. Возможно, из-за постепенного затухания эндогенных процессов эволюция литосферы замедляется в отличие от ускоряющейся эволюции биосферы. Изложенное выше показывает тот путь, на котором могут быть выявлены факторы эволюции литосферы. Мы полагали, что концентрирование рассеянных элементов (определяющее эволюцию литосферы) происходит на подвижном температурном барьере, что является схематизацией, упрощенной моделью сложного природного процесса эволюции литосферы. В эпохи тектономагматической активизации функционировали подвижные геохимические барьеры разной физико-химической природы. Их совокупное действие в неоднократно повторяющихся эпохи активизации обусловило необратимую эволюцию литосферы в целом.

Общие закономерности эволюции литосферы сформулируем следующим образом. Эволюция литосферы по пути все большей дифференциации и концентрации вещества земной коры протекает при фильтрации эндогенных флюидов — путем сопряжения процессов концентрирования рассеянных элементов горных пород с процессами функционирования подвижных геохимических барьеров. При прогрессивной эволюции литосферы возрастает КПД сопряженных процессов концентрирования рассеянного вещества верхней мантии и земной коры, протекающих на подвижных геохимических барьерах. Прогрессивная эволюция литосферы приурочена к эпохам тектономагматической активизации и обусловлена изменением в геологическом времени температуры и состава эндогенного источника флюидов.

ОБ ЭВОЛЮЦИИ ОСАДОЧНОГО ПРОЦЕССА

При обсуждении эволюции осадочного процесса [37] обычно рассматриваются изменения со временем типов осадочных пород и условий их образования (состава атмосферы, гидросферы, климата, тектоники и т.п.). Это основополагающий аспект проблемы. В частности, отмечается переход со временем от вулканогенно-осадочного к терригенному, хемогенному и биогенному осадкообразованию. Вместе с тем представляет интерес вопрос о направленности осадочного процесса в отношении его прогресса или регресса.

Осадочный процесс можно представить как превращение изверженных пород на поверхности Земли в осадочные, которое совершается в основном за счет энергии Солнца и лишь частично внутренней энергии Земли. В дальнейшем под действием эндогенной энергии основная часть осадочных пород переходит в глубинные (метаморфические, магматические), которые затем выводятся на поверхность (также за счет эндогенной энергии). В результате реализуется главный эндогенный цикл геохимической миграции. Наряду с этим часть осадочных пород под действием эндогенной энергии может непосредственно выводиться на поверхность — формируется побочный экзогенный геохимический цикл.

Осадочный процесс эволюционирует (прогрессивно или регрессивно), если он включает в себя частные несопроизвольные (сопряженные) процессы, протекающие на фоне самопроизвольных (основных). В результате сопряженных процессов усложняется структура соответствующих открытых геохимических систем, они при определенных условиях удаляются от равновесия с окружающей средой, прогрессивно эволюционируют.

Указанная ситуация, несомненно, имеет место в осадочном процессе. Но если при эндогенном минералообразовании сопряжение реализуется на подвижном геохимическом барьере, то для осадочного процесса имеют значение, помимо этого, сопряженные процессы минералообразования с участием живого вещества.

Биологические процессы относятся к числу сопряженных, протекающих с использованием энергии основного процесса поглощения солнечной энергии или биологического окисления, поэтому и процессы биогенного минералообразования в общем случае также относятся к сопряженным. Например, чтобы построить кремниевый или известковый скелет из насыщенной по кремнию и кальцию морской воды, живым организмам нужно затратить работу. А это и означает, что соответствующие процессы минералообразования — сопряженные.

В осадочном процессе реализуются по крайней мере два типа сопряженных процессов: биогенное минералообразование под действием солнечной энергии, которое обсуждается ниже; и перераспределение и концентрирование рассеянного (рудного) вещества горных пород при катагенезе под действием эндогенной энергии Земли. Что касается последнего процесса, то он протекает на подвижном геохимическом барьере; эволюция такого рода процессов уже рассматривалась.

Наконец, обычно отмечаемое изменение во времени осадочного процесса — от вулканогенно-осадочного к терригенному, хемогенному и биогенному — скорее относится (в свете развитых представлений) к

истории, а не к эволюции осадочного процесса. Так, например, переход от вулканогенно-осадочного к терригенному осадкообразованию есть следствие затухания вулканических процессов со временем и развития водных бассейнов. Но эволюция ли это, т.е. прогресс или регресс? Ответить на этот вопрос нельзя до тех пор, пока не показано существование при вулканогенно-осадочном и терригенном осадкообразовании сопряженных процессов.

В то же время переход к биогенному минералообразованию — это качественный скачок, возникновение эволюционирующих систем минералообразования, в которых на основе солнечной энергии совершается работа концентрирования минералообразующих компонентов.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ БИОГЕННОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Найдем выражение для КПД сопряженного процесса биогенного минералообразования. Совокупность фотосинтезирующих организмов, осуществляющих сопряженный процесс минералообразования (из ненасыщенного раствора — морской воды с концентрацией минералообразующего компонента C_0), будем моделировать открытой системой, в которой существует равновесие минерала с раствором (так что концентрация растворенного вещества равна концентрации насыщения C_n , $C_n > C_0$). При подводе растворенного вещества и солнечной энергии на входе в систему протекает сопряженный процесс минералообразования.

КПД равен отношению работы, выполняемой по реализации сопряженного процесса, к общему количеству подводимой солнечной энергии (ϵ) (см. (2.11)):

$$\eta = A/\epsilon. \quad (3.9)$$

Для работы концентрирования 1г-моля вещества имеем (см. (2.12))

$$A_0 = RT \ln(C_n/C_0). \quad (3.10)$$

С учетом (3.10) выражение для КПД запишем в виде

$$\eta = \frac{nRT}{\epsilon} \ln \frac{C_n}{C_0}, \quad (3.11)$$

где n — число грамм-молей вещества, концентрируемое в процессе за рассматриваемое время t .

Допустим, что величина n пропорциональна превышению концентрации минералообразующего компонента в источнике (морской воде) над некоторой фоновой концентрацией C_n^0 , ниже которой процесс не идет¹:

$$n = \alpha (C_0 - C_n^0), \quad \alpha = \text{const}. \quad (3.12)$$

Тогда окончательно получим

$$\eta = \frac{\gamma (C_0 - C_n^0)}{\epsilon} \ln \frac{C_n}{C_0}, \quad \gamma = \alpha RT. \quad (3.13)$$

¹ Линейная зависимость n от C_0 следует из рассмотрения задачи динамики минералообразования на подвижном геохимическом барьере.

Как и выше, будем понимать под прогрессивной эволюцией минералообразования случай, когда со временем возрастает КПД сопряженного процесса биогенного минералообразования:

$$d\eta/dt > 0, \quad \eta = A/\epsilon. \quad (3.14)$$

Принимая, что усредненный (годовой) поток солнечной энергии существенно не меняется, имеем $\epsilon = \text{const}$. Тогда условие (3.14) означает, что со временем растет работа сопряженного процесса ($dA/dt > 0$, $A = \gamma(C_0 - C_H^0) \ln(C_H/C_0)$). При этом в системе увеличивается относительная концентрация C_H/C_0 растворенного вещества, что означает все большее удаление системы от равновесия с источником, ее прогрессивное развитие.

Из выражения (3.13) видно, что эволюция биогенного минералообразования определяется изменением со временем концентрации C_0 компонента

в источнике. Так как $\frac{d\eta}{dt} = \frac{d\eta}{dC_0} \frac{dC_0}{dt}$, то имеем два уже отмеченных типа эволюции: 1) $d\eta/dC_0 > 0$, $dC_0/dt > 0$ — "эволюция роста" при увеличении концентрации минералообразующего компонента в источнике от C_H^0 до C_H/ϵ , когда происходит в основном увеличение совокупной массы биогенных минералов (численности организмов); 2) $d\eta/dC_0 < 0$, $dC_0/dt < 0$ — "эволюция прогресса" при уменьшении концентрации компонента от C_H до C_H/ϵ . В этом случае система минералообразования отвечает на уменьшение концентрации вещества в источнике ($dC_0 < 0$) совершенствованием, эволюцией сопряженного процесса минералообразования ($d\eta > 0$).

Таким образом, биогенное минералообразование относится к сопряженному эволюционирующему процессу, если морская вода — ненасыщенный по минералообразующим компонентам (кальцию, кремнию и др.) раствор. Когда концентрации этих компонентов менялись со временем, тогда и процесс биогенного минералообразования эволюционировал.

ГЛАВА 4

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ

Широко известны многочисленные работы, в которых обсуждается специфичность живых объектов, их отличие от неживых. Однако существует и другой аспект познания сущности жизни, а именно исследование общих закономерностей в неживой и живой природе. Такие исследования могут открыть новые возможности познания сущности жизни, а следовательно, и ее происхождения.

Биологические объекты относятся к открытым системам, неравновесным по отношению к окружающей среде. Способ поддержания такого устойчивого неравновесия — сопряжение химических реакций. В этом главное, принципиальное сходство рассмотренных выше геохимических

систем с биологическими. Естественно, в биологических системах сопряжение химических реакций носит более сложный характер и происходит по другим механизмам. Однако это не меняет принципиальной стороны сходства неживых и живых химических систем [4, 14, 41].

СОПРЯЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Живая природа представлена автотрофными ("самопитающимися") организмами, которые сами синтезируют необходимые для них питательные вещества из неорганических соединений, — это растения и некоторые (хемосинтезирующие) бактерии — и гетеротрофными, питающимися автотрофами, — это животные, грибы и большинство бактерий.

Наиболее ярко сопряжение процессов выражено у автотрофов, которые осуществляют процесс синтеза органического вещества из углекислого газа и воды. Данный процесс схематически можно представить как реакцию образования гексозы из CO_2 и H_2O :



Этот процесс несамопроизвольный, для него свободная энергия (Гиббса) при стандартных условиях ($P = 1$ атм, $T = 298^\circ\text{K}$) $\Delta G_{298}^\circ = 2870$ кДж (в расчете на образование 1 г-моля $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Поэтому процесс (4.1) осуществляется лишь благодаря сопряжению с самопроизвольными процессами: реакциями окисления неорганических соединений (хемосинтезирующие бактерии) или с поглощением солнечной энергии хлорофиллом растений.

Обсудим условия, при которых реакция (4.1) протекает (слева направо). Изменение свободной энергии в результате образования в растворе $1/6$ г-моля $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (в соответствии с уравнением изотермы химической реакции (4.1) [16]) равно:

$$\Delta F_0' = RT \left(\ln \frac{a_0}{C_0} - \ln \frac{a_{\text{H}}}{C_{\text{H}}} \right) = RT \left(\ln \frac{C_{\text{H}}}{C_0} - \ln \frac{a_{\text{H}}}{a_0} \right). \quad (4.2)$$

Здесь C_0 и a_0 — неравновесные концентрации CO_2 и O_2 ; C_{H} и a_{H} — их равновесные концентрации.

Из (4.2) видно, что реакция (4.1) протекает ($\Delta F_0' < 0$), когда концентрация образующегося кислорода весьма мала:

$$a_0 < K_C C_0, \quad K_C = a_{\text{H}}/C_{\text{H}},$$

K_C — константа равновесия реакции (4.1). Это реализуется, если имеется эффективный "поглотитель" образующегося при реакции (4.1) кислорода. Именно таким образом функционируют хемосинтезирующие бактерии. В частности, в случае железобактерий образующийся по реакции (4.1) кислород расходуется на окисление двухвалентного железа:



В результате равновесие реакции (4.1) непрерывно сдвигается в сторону образования органического вещества.

Изменение свободной энергии в результате образования 2 г-молей

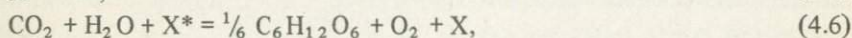
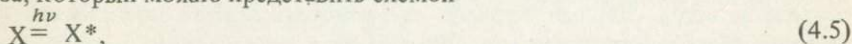
Fe_2O_3 запишем в виде

$$\Delta F_0'' = RT \ln (a_0/a_n), \quad (4.4)$$

где a_n — неравновесная для реакции (4.3) концентрация (совпадающая с равновесной концентрацией O_2 по реакции (4.1)); a_0 — равновесная концентрация O_2 (совпадающая с неравновесной концентрацией по (4.1)).

Уравнения (4.2), (4.4) показывают, что при функционировании данной системы по существу происходит термодинамическое сопряжение несамостоятельного процесса концентрирования CO_2 (от концентрации C_0 в источнике до C_n в системе, $C_n > C_0$) с основной (самопроизвольной) реакцией (4.3), т.е. (ср.с. (2.17)) $\Delta F_0' = \Delta F_{01}' + \Delta F_0''$ ($\Delta F_0' < 0$); $\Delta F_{01}' = RT \ln (C_n/C_0)$ ($\Delta F_{01}' > 0$); $\Delta F_0'' = RT \ln (a_0/a_n)$ ($\Delta F_0'' < 0$).

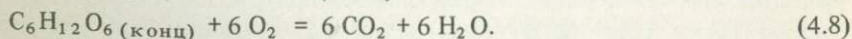
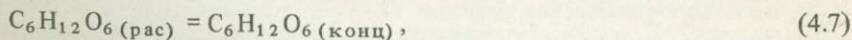
Несколько иной характер имеет сопряжение процессов в случае фотосинтеза, который можно представить схемой



где X и X^* — обозначение хлорофилла до и после поглощения кванта света $h\nu$. В этом случае "сопрягающим компонентом" можно считать хлорофилл, расходование которого в процессе (4.5) непрерывно сдвигает равновесие процесса (4.6) в сторону образования органического вещества. Это позволяет формально трактовать фотосинтез на основе термодинамического сопряжения несамостоятельного процесса (4.1) с основным (самопроизвольным) процессом (4.5) поглощения солнечной энергии хлорофиллом.

Рассмотрим сопряжение процессов у гетеротрофов. Основным является биохимический процесс окисления органических веществ (реакция (4.1), идущая справа налево и поэтому самопроизвольная), обеспечивающий энергетически функционирование гетеротрофов. Что касается сопряженного процесса (протекающего лишь при наличии основного), то им является, по существу, сам процесс функционирования гетеротрофов. Он включает в себя реализацию "активного" транспорта вещества из источника в систему, построение организмов, поддержание их структуры и т.д.

Будем рассматривать функционирование гетеротрофов формально как процесс концентрирования "рассеянного" органического вещества от уровня q_0 в источнике (окружающей среде) до q_{\max} в системе, моделирующей гетеротрофы. Величины q_0 и q_{\max} имеют эффективный характер, они характеризуют в обобщенном виде вещество источника и системы. Схематически основной и сопряженный процессы можно представить в виде



При этом роль основного процесса (4.8) формально сводится к непрерывному смещению равновесия сопряженного процесса (4.7) вправо за счет расходования по (4.8) "концентрированного" органического вещества.

Таким образом, при функционировании гетеротрофов, в рамках принятых модельных представлений, происходит несамостоятельный процесс концентрирования рассеянного органического вещества, сопряженный с самопроизвольным процессом биологического окисления.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОПРЯЖЕННЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Обсудим существенные свойства, общие для рассмотренных выше сопряженных геохимических процессов (в частности, для минералообразования на подвижном геохимическом барьере) и для биологических процессов.

1. Сопряжение процессов. В нем, как уже показано, суть функционирования биологических систем.

2. Динамическое неравновесие относительно окружающей среды. Динамическое неравновесие биологических систем, при котором процессы распада непрерывно компенсируются синтезом благодаря потреблению энергии основной реакции, отмечалось многими исследователями. Что касается минералообразования, то, как показано, концентрация растворенного вещества MeA в зоне минерализации превышает концентрацию в источнике (см. рис. 3).

Тем самым система минералообразования неравновесна относительно окружающей среды, и это неравновесие также имеет динамический характер. При прекращении основной реакции система минералообразования неизбежно распадается, так же как и биологические системы.

3. Функционирование за счет непрерывного массообмена с окружающей средой¹.

4. Постоянное самообновление составных частей систем.

5. Конечное время "жизни" индивидов (в системе минералообразования — кристаллических частиц).

6. Эволюция системы при изменении внешних условий. Эволюция минералообразования уже подробно обсуждалась, ниже будет рассмотрена биологическая эволюция.

7. Эволюция геохимических и биологических систем в целом (а не на уровне отдельных индивидов).

8. Прогрессивный характер геохимической и биологической эволюции.

Изложенное выше позволяет констатировать, что ряд признаков, на основе которых открытые химические системы зачастую относятся к биологическим, на самом деле таковыми не являются.

В чем же специфика биологических систем? Отметим в связи с этим следующее. Геохимические системы с сопряженными процессами концентрирования вещества устойчиво реализуются лишь в случае конвективного массопереноса. При этом, образно говоря, основной процесс создает в потоке подвижную полупроницаемую перегородку, беспрепятственно пропускающую растворитель и задерживающую растворенное вещество (MeA). Подвод же растворенного вещества к перегородке осуществляется за счет перепада давления в жидкости. В случае диффузионного массопереноса устойчивое существование сопряженной системы минералообразования, неравновесной относительно окружающей среды, маловероятно [11], поскольку диффузия будет стремиться выравнивать концентрации растворенного вещества в системе и источнике.

Наоборот, в биологических системах устойчивое неравновесие относительно окружающей среды реализуется при диффузионном массообмене с окружающей средой путем "активного" транспорта (против градиента

¹ Пункты 3–5, 7, 8 не требуют особых пояснений.

концентрации) через биологические мембраны благодаря тому, что подвод вещества осуществляется не внешними силами (в случае системы минералообразования — за счет разности уровней жидкости в источнике и приемнике), а действующими внутри самой системы. Эти силы на молекулярном уровне хорошо известны [22]. Они действуют между взаимно комплементарными структурами и ответственны за образование специфических комплексов: антиген—антитело, фермент—субстрат и др. Взаимно комплементарные участки молекул аддитивны по своей электронной конфигурации, благодаря чему и возникают силы взаимного притяжения, обуславливающие образование специфического комплекса. Действие этих сил и приводит к активному "захвату" из диффузного раствора комплементарного соединения.

На клеточном уровне "активный" (против градиента концентрации) транспорт через биологические мембраны реализуется благодаря наличию в живой клетке специфических преобразователей энергии основной реакции и нервной системы. Однако термодинамика не рассматривает механизмы процессов, и это дает возможность изучить энергетику неживых и живых систем в рамках единого термодинамического подхода.

Естественно, отличие живого от неживого не сводится лишь к способу реализации массообмена с окружающей средой. Такое отличие наиболее существенно в рамках обсуждаемых моделей.

Таким образом, геохимическим и биологическим процессам свойственны общие существенные закономерности, и поэтому возникновение жизни на Земле является законом естественной эволюции геохимических процессов. Появление биологического типа эволюции и организации земного вещества — процесс термодинамически и геохимически обусловленный [14].

ОБ ОДНОМ ИЗ ВЕРОЯТНЫХ ПУТЕЙ ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

В литературе широко обсуждается возможность синтеза биологически ценных молекул в различных природных процессах [44], в частности при подводном вулканизме [28]. Вместе с тем подчеркивается другая сторона проблемы биогенеза — необходимость установления механизма концентрирования этих молекул, локализации химических реакций в определенных областях пространства, динамической организации предбиологических систем [29].

Один из способов предбиологической эволюции мог реализоваться на основе сопряженной системы на подвижном геохимическом барьере, поскольку именно эта система обладает рядом существенных свойств, характерных для биологических объектов.

Растворимые органические вещества, которые могли синтезироваться в подводных вулканах [28], выносились водами термальных источников. В зонах подвижных геохимических барьеров (при снижении в потоке температуры растворов, изменении кислотности и т.п.) организовывались предбиологические системы, аналогичные рассмотренной выше системе минералообразования, но синтезированные из растворимых органических соединений.

Физико-химические законы, по которым протекала дальнейшая эволюция этих систем, пока еще не ясны (поскольку отсутствуют необходимые теоретические и экспериментальные данные). Вместе с тем следует отметить возможность изменения условий функционирования этих систем, что могло иметь значение для их эволюции.

Действительно, как уже указывалось, отличие живого от неживого в отношении процессов обмена с окружающей средой — в способе реализации этих процессов. В случае неживых систем необходим принудительный подвод вещества и энергии, тогда как живые системы сами осуществляют подвод вещества. Так, хемосинтезирующие и фотосинтезирующие организмы используют внешние потоки энергии (Земли, Солнца), но зато сами реализуют необходимый подвод вещества. Животные также сами подводят вещество, которое используется (в процессе биологического окисления) для получения необходимой энергии. Наконец, человек сам осуществляет подвод как вещества, так и энергии (используя энергетические ресурсы Земли).

Поэтому переход к живым системам означал эволюционный скачок, создание систем, для функционирования которых уже не требуется принудительного подвода вещества (а необходим лишь подвод энергии). Смена условий с принудительным подводом вещества и энергии на условия с принудительным подводом только энергии могла произойти в потоках гидротерм (при изменениях в источнике, когда в нем "исчерпывалось" требуемое растворенное органическое вещество). Именно здесь могли создаваться необходимые условия для перехода к живым системам.

Естественно, системы, о которых идет речь, еще далеки от живых, тем не менее они обладают рядом существенных признаков, сближающих их с биологическими системами. При этом разрешается важная проблема предбиологической эволюции — концентрирования органических молекул в локальном объеме. Однако важнейшая проблема — организация сложной структуры живой клетки, возникновение специфического механизма сопряжения процессов — остается нерешенной.

И хотя законы перехода от неживого к живому еще не ясны, тем не менее можно указать общий принцип, которому подчиняются открытые химические системы и на основе которого можно объяснить эволюцию предбиологическую. Таким принципом следует считать саморегулирование химических реакций за счет механизма обратной связи с окружающей средой, благодаря которому система таким образом реагирует на изменения во внешней среде, чтобы изменения в самой системе были минимальными. Этот принцип может быть назван принципом "самосохранения" химических систем. Он справедлив для тех состояний предбиологических систем, через которые осуществлялось их эволюционное развитие. По существу принцип самосохранения является следствием пройденного пути эволюции, на котором предбиологические и биологические системы с неизбежностью должны быть устойчивыми к изменениям физико-химических условий внешней среды.

В то же время изменение условий внешней среды является движущей силой эволюции открытых химических систем с сопряженными процессами. Реакция открытых систем на изменения внешних условий привела к появлению многих специфических функций живого организма,

направленных на его сохранение и функционирование в многократно изменявшихся на протяжении геологической истории условиях среды жизнеобитания. Функция деления (размножения) по существу является крайним выражением принципа самосохранения систем.

ГЛАВА 5

ЭВОЛЮЦИЯ БИОСФЕРЫ

Биологическая эволюция происходит по пути улучшения приспособляемости организмов к среде обитания. Дарвиновская теория естественного отбора, в соответствии с которой выживают наиболее приспособленные к среде обитания организмы, акцентирует основное внимание на вопросе, как происходит эволюция — путем борьбы за существование и конкуренции за подходящие места обитания. Вместе с тем она качественно включает в себя и причины эволюции — ограниченность местообитаний и источников пищи.

Развиваемая ниже модель геобиологической эволюции, наоборот, акцентирует внимание на причинах эволюции, показывая, что главная линия прогрессивной эволюции биологических систем обусловлена постепенно "ухудшающимися" условиями внешней среды. Чтобы при этом выжить, биологические системы должны были увеличивать эффективность процессов функционирования, КПД сопряженных процессов, т.е. эволюционировать.

При рассмотрении геобиологической эволюции также следует различать эволюцию систем и процессов. Ниже обсуждается в основном эволюция биологических процессов. При этом биологические объекты моделируются системой, в которой существует внутреннее равновесие и неравновесие относительно окружающей среды. Это позволяет вслед за авторами [10, 17, 41] использовать аппарат термодинамических функций. Представление о живых организмах как динамически равновесных системах разделяется рядом биологов [50] и подтверждается, в частности, изотопными исследованиями [9].

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ УГЛЕРОДА

Выше было показано, что эволюция открытых систем с сопряженными процессами реализуется при изменении со временем энергетики основного и работы сопряженного процесса. Для фотосинтезирующих объектов работа сопряженного процесса (4.1) (синтеза органического вещества из CO_2 и H_2O) зависит от концентрации CO_2 в атмосфере, поэтому для выяснения возможных факторов эволюции фотосинтезирующих объектов надо исследовать, как в истории Земли менялась концентрация CO_2 в атмосфере.

Используя допущение о пропорциональности скорости карбонатнакопления массе CO_2 в атмосфере, авторы [3] рассчитали на основе данных по скорости карбонатнакопления изменение массы CO_2 в атмосфере на протяжении фанерозоя. Оказалось, что масса CO_2 менялась неоднократно,

но лишь в пределах одного порядка. Другой способ рассмотрения этого вопроса — использование методов теории динамики геохимических процессов [11], что предполагает построение математической модели геохимического цикла углерода и решение обратной задачи — реставрации изменения массы CO_2 в атмосфере по данным о скорости захоронения углерода в составе органического вещества и карбонатов.

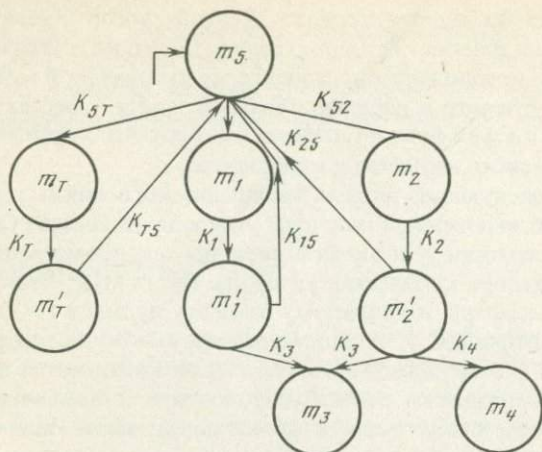
Рассмотрим следующую модель геохимического цикла углерода. Положим, существует эндогенный источник углерода (в составе CO_2), который выбрасывает в атмосферу и океан в периоды тектономагматической активизации определенное количество углерода. Пусть m_{50} — масса углерода в составе CO_2 атмосферы к условному моменту времени $t = 0$, от которого рассматривается процесс. К любому времени $t > 0$ углерод распределится между живыми и отмершими организмами на континентах и в океане, захороненным органическим веществом, океаном и осадочными породами (главным образом биогенными карбонатами); часть углерода останется в атмосфере.

Для количественного описания распределения углерода необходимо знать вид кинетических уравнений, характеризующих скорость перехода углерода из одной системы в другую (рис. 9). Поскольку точный вид этих уравнений не известен, то вначале мы принимали наиболее простое допущение о том, что удельная скорость (отнесенная к единице массы) массообмена между резервуарами углерода постоянна (линейная модель), как это часто допускается в моделях геохимического цикла.

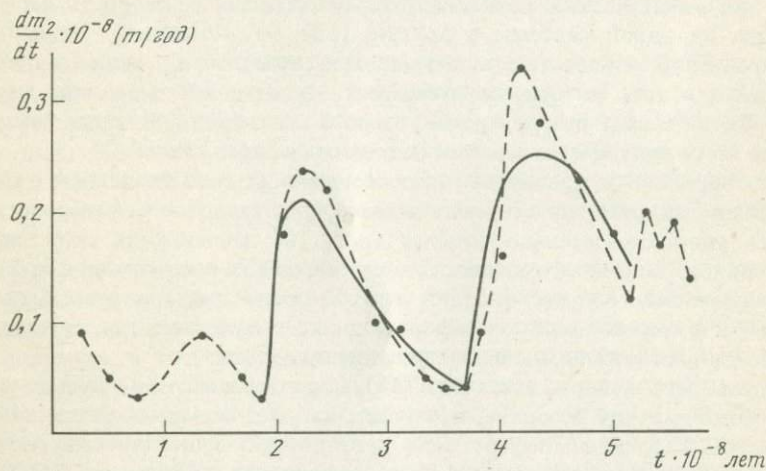
Интегрированием уравнений массообмена и их сопоставлением с геологическими данными по скорости захоронения углерода в фанерозое нам удалось удовлетворительно описать (рис. 10) зависимость скорости захоронения органического вещества и карбонатов на протяжении фанерозоя (по данным А.Б. Ронова [40]) и на этой основе реставрировать изменение CO_2 в фанерозойской атмосфере. Однако полученные при этом результаты не удовлетворительны по следующим причинам.

Модель "мгновенного источника" CO_2 , учитывающая конечную скорость массообмена между резервуарами углерода, дает четыре порядка изменения массы CO_2 в атмосфере. Это противоречит совокупности геологических данных по фанерозою. Модель "длительного источника" CO_2 (учитывающая конечное время действия эндогенного источника CO_2) хотя дает лишь один порядок изменения CO_2 в атмосфере, в то же время предсказывает и один порядок изменения массы живого вещества в фанерозое. Это связано с тем, что в линейной модели скорость захоронения органического вещества и карбонатов (которая по геологическим данным менялась в фанерозое в пределах одного порядка) предполагается пропорциональной массе живого вещества. Десятикратное изменение массы живого вещества в фанерозое маловероятно. Недостатком линейной модели является также принимаемая пропорциональная зависимость между биопродуктивностью (скоростью фотосинтеза) и концентрацией CO_2 в атмосфере. В действительности эта зависимость имеет нелинейный характер: с увеличением CO_2 рост биопродуктивности замедляется.

Указанных затруднений удастся избежать, если рассмотреть нелинейную модель. Ограничимся той частью цикла, которая ответственна за захоронение углерода на континентах (поскольку для континентов имеются



Р и с. 9. Схема массообмена углерода в геохимическом цикле



Р и с. 10. Зависимость скорости захоронения органического углерода от времени (пунктиром показаны данные А.Б. Ронова [40], сплошной линией – данные расчетов по линейной модели "мгновенного" источника). За начало отсчета времени принят нижний девон

наиболее полные данные по скорости захоронения [3]). Пусть m_T – масса углерода в составе живого вещества "транзитных" систем (тропический лес и др.), в которых захоронение практически отсутствует; m_1 (m_1') и m_2 (m_2') – масса углерода в живых (отмерших) организмах суши и континентальных морей. Запишем следующие уравнения массообмена углерода¹:

$$\frac{dm_T}{dt} = k_{5T}m_5(m_T^0 - m_T) - k_T m_T, \quad (5.1)$$

¹ Автор не учитывает дыхание растений, что упрощает выкладки, приводя к аналогичным выводам.

$$\frac{dm_T'}{dt} = k_T m_T - k_{T5} m_T', \quad (5.2)$$

$$\frac{dm_1}{dt} = k_{51} m_5 (m_1^0 - m_1) - k_1 m_1, \quad (5.3)$$

$$\frac{dm_1'}{dt} = k_1 m_1 - k_{15} m_1' - k_3 m_1', \quad (5.4)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = k_{52} m_5 (m_2^0 - m_2) - k_2 m_2, \quad (5.5)$$

$$\frac{dm_2'}{dt} = k_2 m_2 - k_{25} m_2' - k_3 m_2', \quad (5.6)$$

$$\frac{dm_3}{dt} = k_3 (m_1' + m_2')^n. \quad (5.7)$$

Здесь m_3 — масса углерода в захороненном органическом веществе; через "k" с индексами обозначены постоянные величины, имеющие смысл констант массообмена между соответствующими резервуарами углерода (см. рис. 9). В уравнениях (5.1), (5.5) учтено, что при стремлении массы живого вещества к предельным значениям (m_T^0 , m_1^0 , m_2^0) рост биопродуктивности замедляется, асимптотически стремясь к нулю. Уравнение (5.7) записано в допущении нелинейной связи (при $n \neq 1$) между скоростью захоронения органики и массой отмерших организмов.

В дальнейшем ограничимся квазистационарным приближением, допуская, что скорость обратимого массообмена между атмосферой и биотой существенно больше, чем скорость изменения массы (концентрации) CO_2 в атмосфере за счет эндогенного источника. Тогда, полагая в (5.1) — (5.7) величины k_{5T} , k_T , k_{51} , k_1 , k_{52} , k_2 стремящимися к бесконечности и конечными производные от массы углерода по времени, получим равновесные зависимости между массой углерода в резервуарах:

$$m_T = \frac{k_{5T} m_T^0 m_5}{k_{51} m_5 + k_T}, \quad (5.8)$$

$$m_T' = K_{T5} m_T, \quad K_{T5} = k_T / k_{T5}, \quad (5.9)$$

$$m_1 = k_{51} m_1^0 m_5 / (k_{51} m_5 + k_1), \quad (5.10)$$

$$m_1' = k_1 m_1, \quad K_1 = k_1 / (k_{15} + k_{13}), \quad (5.11)$$

$$m_2 = k_{52} m_2^0 m_5 / k_{52} m_5 + k_2, \quad (5.12)$$

$$m_2' = K_2 m_2, \quad K_2 = k_2 / k_{25} + k_{23}. \quad (5.13)$$

Положим в первом приближении, что соотношение между массой живого вещества континентальных морей и суши не менялось со временем, т.е.

$$m_2 = \alpha m_1, \quad \alpha = \text{const.} \quad (5.14)$$

Тогда, подставляя выражения (5.11) и (5.13) с учетом (5.14) в (5.7), най-

дем

$$m_2 = (1/\beta) (dm_3/dt)^{1/n}, \quad \beta = k_3(\alpha K_1 + K_2)^n. \quad (5.15)$$

Уравнения (5.14), (5.15) позволяют по скорости захоронения органического вещества dm_3/dt реставрировать изменение массы живого вещества ($m_1 + m_2$) в "аккумулятивных" системах континентов (если известны параметры α, β, n). Зная m_2 , из уравнения (5.12) рассчитаем массу углерода в атмосфере (если известны постоянные величины k_2, k_{s2}, m_2^0). Определив m_5 , по уравнению (5.8) найдем массу m_T живого вещества "транзитных" систем (при задании соответствующих параметров уравнения (5.8)).

Если масса CO_2 в атмосфере достаточно велика ($m_5 \gg k_T/k_{sT}, m_5 \gg k_2/k_{s2}$), то на основе выражений (5.8), (5.12), (5.13) для суммарной массы биоты имеем

$$m = m_T + m_1 + m_2 = m_T^0 + m_1^0 + m_2^0. \quad (5.16)$$

В этом случае масса биоты не меняется со временем в соответствии с представлениями В.И. Вернадского [7]. Постоянство массы биоты вполне могло иметь место на определенных отрезках времени. Действительно, при парциальном давлении CO_2 , в несколько раз (в 5 и более) большем современного ($P_{\text{CO}_2} \geq P_{\text{CO}_2, \text{max}}$), скорость фотосинтеза перестает существенно зависеть от P_{CO_2} . Нет оснований отрицать аналогичный эффект и для фотосинтезирующих объектов в геологическом прошлом. И если нижний предел изменения P_{CO_2} был большим $P_{\text{CO}_2, \text{max}}$, то масса биоты могла не меняться. Однако при $m = \text{const}$ развиваемая модель не объясняет изменение скорости захоронения органического вещества со временем [3].

Если масса CO_2 в атмосфере достаточно мала ($m_5 \ll k_T/k_{sT}, m_5 \ll k_2/k_{s2}$), то приходим к линейной модели. В некотором же "среднем" интервале изменения m_5 уравнение (5.12) допускает следующую аппроксимацию:

$$m_2 = \gamma m_5^{1/r}, \quad r > 1; \quad r_T, \gamma = \text{const}, \quad (5.17)$$

Откуда с учетом (5.16) имеем

$$m_5 = \frac{1}{(\beta\gamma)^r} \left(\frac{dm_3}{dt} \right)^{r/n}. \quad (5.18)$$

Допуская для уравнения (5.8) аппроксимацию, аналогичную (5.17):

$$m_T = \gamma_T m_5^{1/r_T}, \quad r_T > 1; \quad r_T, \gamma = \text{const}, \quad (5.19)$$

имеем

$$m_T = \frac{\gamma_T}{(\beta\gamma)^r} \left(\frac{dm_3}{dt} \right)^{r/r_T n}. \quad (5.20)$$

Тогда суммарная масса биоты будет (при $r_T = r$)

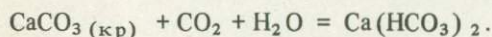
$$m = m_T + m_1 + m_2 = \lambda (dm_3/dt)^{1/n}, \quad (5.21)$$

причем $\lambda = \frac{\gamma_T}{(\beta\gamma)^r} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta}$.

На основе уравнений (5.18), (5.21) удается избежать тех противоречий линейной модели, о которых говорилось выше. При $n > 1$ масса m биоты меняется в относительно меньших пределах, чем dm_3/dt ; в то же время возможные пределы относительного изменения m_5 больше, чем m . В частности, согласно А.Б. Ронову [40], скорость захоронения органического вещества в фанерозое менялась в пределах одного порядка. При $n = 1$ масса биоты в соответствии с (5.20) варьирует в этом же интервале, при $n = 2$ — меняется в 3,33 раза и т.д. В то же время масса CO_2 в атмосфере варьирует в зависимости от параметра r в больших пределах. Так, при $n = 2$, $r = 2$ масса CO_2 меняется на один порядок, при $n = 2$, $r = 3$ — в 33,3 раза и т.д. Для скорости захоронения углерода в составе карбонатов по аналогии с (5.7) имеем

$$dm_4/dt = k_4 m_{2\kappa}' \quad (5.22)$$

где $m_{2\kappa}'$ — масса карбонатов в составе отмершей биоты морей. Скорость растворения карбоната кальция в составе отмерших организмов, по-видимому, зависит от концентрации (массы) CO_2 в атмосфере (и соответственно в морях). Это видно из простой реакции растворения CaCO_3 :



Чем больше концентрация растворенного CO_2 , тем больше карбоната кальция растворяется в единицу времени (если принять, что эта реакция 1-го порядка по CO_2 [11]). Поэтому для величины $dm_{2\kappa}'/dt$ запишем следующее уравнение.

$$dm_{2\kappa}'/dt = k_2 m_{2\kappa} - k_4 m_{2\kappa}' - k_p m_5, \quad (5.23)$$

где $m_{2\kappa}$ — масса карбонатов в составе биоты морей; k_p — константа скорости растворения.

Для дальнейших выкладок приближенно положим $m_{2\kappa}$ пропорциональной общей массе биоты:

$$m_{2\kappa} = a m_2, \quad a = \text{const}. \quad (5.24)$$

В равновесном приближении $k_2 \rightarrow \infty$ и $dm_{2\kappa}'/dt$ конечна. Тогда

$$m_{2\kappa}' = (k_2^* m_2 - k_p m_5) / k_4, \quad k_2^* = k_2 a. \quad (5.25)$$

Подставляя (5.25) в (5.22) и учитывая для m_2 приближение (5.17), будем иметь следующее уравнение для скорости захоронения в зависимости от массы CO_2 в атмосфере:

$$dm_4/dt = k_4^{1-n} (k_2^* \gamma m_5^{1/r} - k_p m_5)^n. \quad (5.26)$$

Видно, что эта зависимость имеет более сложный характер, чем аналогичная (уравнение (5.28)) для скорости захоронения органического вещества. Уравнение (5.26) упрощается, если масса CO_2 в атмосфере относительно мала: $m_5 \ll (k_2^* \gamma / k_p)^{r/(1-r)}$. Тогда на основе (5.26) получаем уравнение, аналогичное (5.18):

$$m_5 = [1 / (k_2^* \gamma)^r k_4^{1-n}] (dm_4/dt)^{r/n}. \quad (5.27)$$

Если же масса CO_2 в атмосфере не "мала" ($m_5 \approx (k_2^* \gamma / k_p)^{r/(1-r)}$), то вторым членом в правой части уравнения (5.26) уже нельзя пренебречь. Тогда

с ростом m_5 скорость захоронения CaCO_3 будет уменьшаться и, наоборот, с уменьшением m_5 — увеличиваться.

Полученные данные позволяют разрешить противоречие между фактическими данными авторов [23, 40] по скоростям захоронения карбонатов и органического вещества в фанерозое. Так, согласно данным А.Б. Ронова [40], усредненные на большие промежутки времени (десятки миллионов лет) скорости захоронения, как правило, качественно одинаково зависят от времени: максимуму скорости захоронения органического вещества соответствует максимум скорости захоронения карбонатов, совпадают по времени и минимальные значения этих величин (см. рис. 10). Другие данные, основанные на существенно меньших интервалах времени осреднения (первые миллионы лет), дают противоположную картину [23]: максимуму скорости захоронения органики соответствует минимум скорости захоронения карбонатов, и наоборот.

Указанное противоречие разрешается, если допустить, что при малых временах осреднения величины m_5 и $(k_2^* \gamma / k_p)^{r/(1-r)}$ могут быть сопоставимы ($m_5 \approx (k_2^* \gamma / k_p)^{r/(1-r)}$), а при больших — нет ($m_5 \ll (k_2^* \gamma / k_p)^{r/(1-r)}$). Это означает, что масса CO_2 в атмосфере была в среднем (на больших временных интервалах) "мала", но в отдельные относительно короткие интервалы времени существенно возростала.

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕСТАВРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ CO_2 АТМОСФЕРЫ И МАССЫ БИОТЫ В ФАНЕРОЗОЕ

Параметры уравнений для массы углерода в атмосфере и биоте не известны. В принципе могут быть оценены лишь современные значения аналогичных параметров. Однако, насколько эти данные могли бы быть отнесены к фанерозою, этот вопрос все равно остался бы открытым.

В развитой модели не учтены по крайней мере следующие осложняющие факторы: возможность существенного изменения параметра a в уравнении (5.24) со временем из-за изменения соотношения море—суша на протяжении фанерозоя; зависимость констант массообмена углерода между резервуарами от физико-химических условий среды, которые могли существенно меняться из-за климатического и других факторов; лимитирование скорости фотосинтеза питательными веществами (азотом, фосфором, калием и др.).

Незнание параметров расчетных формул затрудняет реставрацию изменения CO_2 атмосферы в фанерозое, а не учтенные в модели факторы налагают принципиальные ограничения на решение этой задачи. Поэтому рассмотрим лишь один из возможных вариантов решения этой задачи, использующий и несколько развивающий подход авторов [3].

Для расчета относительного изменения массы CO_2 в фанерозойской атмосфере используем приближенные зависимости (5.18), (5.27). В них необходимо задать параметры r и n . Сведения об их современных значениях могут быть получены на основе анализа экспериментальных данных по зависимости скорости фотосинтеза от концентрации CO_2 (r) и количественных геологических данных по скоростям накопления органического вещества в морях относительно массы живого вещества (n).

Из-за неполноты таких данных используем основной постулат, принятый авторами [3] на основе установленной ими линейной зависимости между массой вулканических пород и карбонатов, образовавшихся за соответствующие геологические эпохи фанерозоя: скорость захоронения карбонатов пропорциональна массе углекислого газа в атмосфере. Тогда в уравнении (5.27) имеем $r = n$.

Из уравнений (5.18), (5.27) следует, что изменение со временем массы CO_2 в атмосфере повторяет (с точностью до постоянного множителя) зависимости скорости захоронения от времени как органического вещества, так и карбонатов. Значения $m_s/m_{s\max}$, характеризующие относительную массу CO_2 (по отношению к максимально наблюдаемой $m_{s\max}$) в атмосфере, найдены в соответствии с уравнениями (5.18), (5.27) на основе данных [3] по скоростям накопления в фанерозое органического вещества и карбонатов (рис. 11).

Эти зависимости качественно согласуются друг с другом. Одинаков предел (один порядок) изменения $m_s/m_{s\max}$, имеются частично согласованные по координате времени максимумы и минимумы на этих кривых. Определенное соответствие полученных результатов на основе независимых данных (по скорости захоронения биогенного органического вещества и карбонатов) свидетельствует в пользу того, что развитая модель геохимического цикла углерода отражает существенные свойства процесса. В связи с этим следует заметить, что авторам [3] удалось пойти дальше: путем ряда экстраполяций найти численное значение коэффициента пропорциональности между массой углерода и скоростью карбонатонакопления и рассчитать таким образом абсолютные значения содержания CO_2 в атмосфере.

Для реставрации изменения массы биоты в фанерозое недостаточно принятого условия $r = n$, а необходимо в соответствии с (5.21) задать параметр n , характеризующий связь между скоростью захоронения органического вещества и массой биоты (в соответствии с уравнениями (5.7), (5.11) и (5.13)). Используем искусственный прием, заключающийся в задании максимально возможного интервала изменения массы биоты в фанерозое. Положим, масса биоты менялась максимум в 3 раза, т.е. $m_{\max} \approx 3m_{\min}$. Так как, по данным А.Б. Ронова [3], $(dm_3/dt)_{\max} \approx 10(dm_3/dt)_{\min}$, то в соответствии с (5.21) имеем $3^n \approx 10$ и $n \approx 2$. Расчет изменения со временем относительной массы биоты m/m_{\max} на основе данных по скорости захоронения органического вещества ведется по уравнению (5.21). Аналогично рассчитывается относительная масса биоты по скорости захоронения карбонатов (рис. 12).

На основе полученных результатов можно сделать следующие заключения. Один порядок изменения массы CO_2 в фанерозойской атмосфере — лишь нижний возможный предел такого изменения. Если эндогенный источник CO_2 действовал "мгновенно", это приводит к существенно большему интервалу изменения CO_2 . Скорости захоронения органического вещества и карбонатов функционально связаны друг с другом, поэтому задачу реставрации CO_2 в атмосфере надо решать, используя как данные по скорости захоронения органического вещества, так и карбонатов. Зависимость скоростей захоронения органического вещества и карбонатов от концентрации CO_2 в атмосфере в общем случае не линейна. Сопоставле-

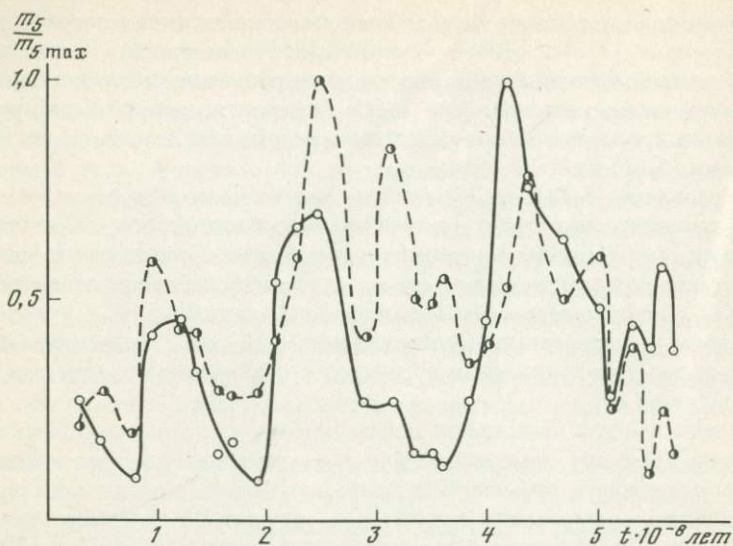


Рис. 11. Зависимость относительной массы CO_2 в атмосфере от времени для фанерозоя, рассчитанная по скорости захоронения органического вещества (сплошная линия) и карбонатов (пунктир)

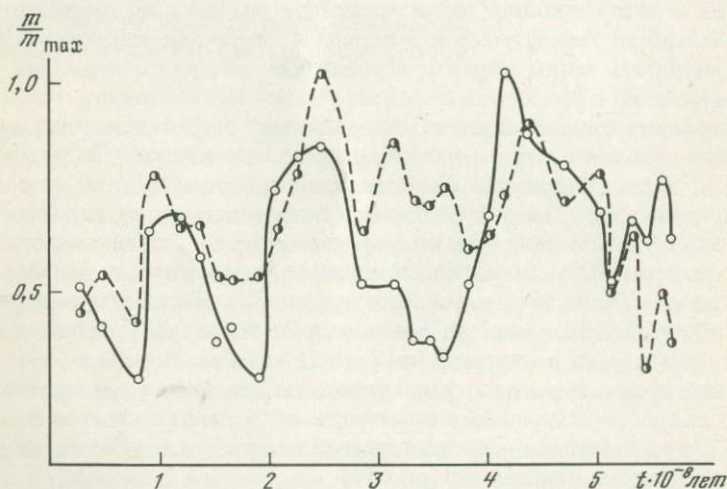


Рис. 12. Зависимость относительной массы биоты от времени для фанерозоя, рассчитанная по скорости захоронения органического вещества (сплошная линия) и карбонатов (пунктир)

ние данных по скоростям захоронения органического вещества и карбонатов необходимо вести с учетом длительности времени осреднения при расчете скоростей: при больших временах осреднения они меняются синфазно, при малых эти изменения могут находиться в противофазе. Последнее имеет место, если геологические данные по скоростям захоронения приходятся на периоды существенного роста концентрации CO_2 в атмосфере (за

счет усиления вулканизма). В эти периоды морские организмы с карбонатными скелетами функционировали в условиях большого недонасыщения морских вод CaCO_3 — они строили свои скелеты из ненасыщенных растворов. После отмирания скелеты интенсивно растворялись. Именно поэтому максимуму осаждения органического вещества соответствует (в эти периоды) минимум осаждения карбонатов.

В заключение заметим, что еще далеко до действительного решения задачи реставрации CO_2 в атмосфере в геологическом прошлом. В принципе нельзя исключить и вариант, при котором масса CO_2 в атмосфере "в среднем" (на достаточно больших временных интервалах) не менялась, а изменение скорости захоронения органического вещества и карбонатов происходило за счет увеличения удельной скорости захоронения (величин k_3 и k_4) в эпохи вулканизма.

ОБ ЭВОЛЮЦИИ ФОТОСИНТЕЗИРУЮЩИХ ОРГАНИЗМОВ

Основную массу биоты составляют фотосинтезирующие объекты (современная масса растений порядка $5 \cdot 10^{11}$ т, а животных — $5 \cdot 10^9$ т). Будем моделировать их совокупность равновесной гетерогенной системой, включающей в себя фазы переменного ($\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$) и постоянного ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) состава. При наличии внутреннего равновесия система, естественно, не равновесна по отношению к окружающей среде (источнику CO_2 и приемнику O_2). Функционирование фотосинтезирующих объектов в рамках термодинамической модели формально сводится к несомопроизвольному процессу синтеза (4.1) органического вещества из CO_2 и H_2O , сопряженному с основным процессом (4.5) поглощения солнечной энергии хлорофиллом растений.

Введем обычным способом КПД сопряженного процесса синтеза органического вещества:

$$\eta = \Delta F' / \epsilon, \quad (5.28)$$

где $\Delta F'$ ($\Delta F' > 0$) — приращение свободной энергии при протекании процесса (4.1); ϵ — количество поглощенной системой солнечной энергии.

Величина η показывает, насколько эффективно солнечная энергия используется сопряженным процессом синтеза органического вещества. Большим величинам η отвечают процессы с большим значением $\Delta F'$, что означает все большее усложнение системы, все большее удаление ее от равновесия со средой. Действительно, чем больше $\Delta F'$, тем большая совершена работа, тем более система неравновесна по отношению к среде.

Допустим в первом приближении, что потоки солнечной энергии существенно не менялись во времени ($\epsilon = \text{const}$). Принимая за условие прогрессивной эволюции фотосинтезирующих объектов рост величины $\Delta F'$ со временем, из уравнения (5.28) получаем $d\Delta F' / dt = \epsilon d\eta / dt$. Следовательно, условия прогрессивной эволюции процесса и объекта при $\epsilon = \text{const}$ совпадают (с точностью до постоянного множителя) и могут быть записаны как

$$d\eta / dt > 0. \quad (5.29)$$

Учитывая связь между массой живого вещества и концентрацией CO_2 ат-

мосферы, следующую из (5.18), (5.21):

$$m = bC_0^{1/r}, \quad b = \text{const}, \quad (5.30)$$

запишем выражение для КПД в виде

$$\eta = \frac{m\Delta F_0'}{\epsilon} = \frac{\nu C_0^{1/r}}{\epsilon_0} \left(\ln \frac{C_H}{C_0} - \ln \frac{a_H}{a_0} \right), \quad \nu = kT. \quad (5.31)$$

Здесь введена величина

$$\epsilon_0 = \epsilon/b, \quad (5.32)$$

которая есть не что иное, как удельные энергетические затраты процесса фотосинтеза, т.е. количество солнечной энергии, необходимой для образования единицы массы ($m = 1$) органического вещества при концентрации CO_2 в источнике (атмосфере), равной единице ($C_0 = 1$).

Дифференцируя (5.31) по времени, после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{dt} \approx & \frac{\alpha C_0^{1-r/r}}{\epsilon_0 r} \left(\ln \frac{C_H}{C_0} - \ln \frac{a_H}{a_0} \right) \frac{dC_0}{dt} + \frac{\alpha C_0^{1/r}}{\epsilon_0 a_0} \frac{da_0}{dt} - \\ & - \frac{\alpha C_0^{1/r}}{\epsilon_0^2} \left(\ln \frac{C_H}{C_0} - \ln \frac{a_H}{a_0} \right) \frac{d\epsilon_0}{dt}, \end{aligned} \quad (5.33)$$

Откуда видно, что условие (5.29) прогрессивной эволюции выполняется лишь при определенном соотношении производных по времени от величин C_0 , a_0 и ϵ_0 , характеризующих факторы эволюции фотосинтезирующих объектов.

Остановимся на влиянии изменения концентрации CO_2 в источнике (атмосфере) на эволюцию. При возрастающей концентрации CO_2 ($dC_0/dt > 0$) условие (5.29) прогрессивной эволюции может реализоваться при постоянстве приведенных удельных энергетических затрат или даже при некотором их росте ($d\epsilon_0/dt \geq 0$). Это эволюция роста, когда функционирование объектов в условиях растущего "изобилия" относительно формирующего систему компонента (CO_2) приводит преимущественно к увеличению массы фотосинтезирующих объектов без их совершенствования. Наоборот, при уменьшающейся концентрации CO_2 ($dC_0/dt < 0$) прогресс может реализоваться лишь при условии увеличения энергетической эффективности сопряженного процесса (уменьшения приведенных удельных энергетических затрат $d\epsilon_0/dt < 0$). Это эволюция прогресса, когда функционирование объектов в условиях увеличивающегося "голодания" по CO_2 приводит к совершенствованию фотосинтезирующих объектов.

Следовательно, на фоне роста концентрации CO_2 в атмосфере возможны медленные количественные изменения, в то время как при уменьшении CO_2 могут наблюдаться качественные изменения, эволюционные скачки. Последнее реально приводит к отмиранию одних (наиболее неприспособившихся к неблагоприятным внешним условиям) биологических объектов и к зарождению и быстрой эволюции других, лучше приспособленных к этим условиям живых систем. Времена локального увеличения и последующего

уменьшения содержания CO_2 в атмосфере Земли приурочены к крупным глобальным эпохам тектономагматической активизации и интенсивного вулканизма [40, 47], поскольку в результате этих процессов в атмосфере Земли выделяется углекислота из мантии и земной коры. Развита модель эволюции позволяет объяснить соответствие главных эпох эволюции живых систем (отмирания старых и зарождения новых [49]) глобальным эпохам тектономагматической активизации и интенсивного вулканизма (на которое для докембрия указано, в частности, Св.А. Сидоренко и В.А. Теняковым [46]).

В заключение заметим, что рассчитанные выше изменения массы CO_2 атмосферы (см. рис. 11) происходят на протяжении временного интервала в сотни миллионов лет. И хотя макроэволюция протекает весьма медленно, тем не менее указанные интервалы времени для эволюции могут быть чрезмерно большими [2]. Должны существовать изменения массы CO_2 на протяжении более коротких интервалов времени, о чем свидетельствуют и геологические данные по закономерным колебаниям биопродуктивности в истории Земли – биосферным ритмам [23]. Предполагается автоколебательная природа биосферных ритмов как следствие нелинейной реакции биосферы на поступление CO_2 из глубин Земли [23]. Развита модель, по-видимому, позволяет получить решения с колебаниями массы CO_2 около стационарного значения, если в кинетические уравнения массообмена углерода ввести "время запаздывания" τ установления стационарного состояния в биоте. Это означало бы, что биота "чувствует" изменение концентрации CO_2 в атмосфере с запаздыванием на время τ .

ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЖИВОТНОГО МИРА

Эволюция в животном мире происходит путем эволюции популяций, т.е. группы животных, принадлежащих к одному или сходным видам и занимающих определенную территорию [8]. В этом случае основным является процесс (4.8) биологического окисления органических веществ (пищи), обеспечивающий энергетически функционирование популяции. Что касается сопряженного процесса, протекающего на фоне основного, то им является процесс концентрирования, представленный схемой (4.7).

Пусть $A = \Delta F'$ – работа, затрачиваемая на концентрирование рассеянного органического вещества за время t ; ϵ – энергия, получаемая в основном процессе за это же время. Введем КПД сопряженного процесса концентрирования рассеянного органического вещества:

$$\eta = A/\epsilon. \quad (5.34)$$

Примем за условие прогрессивной эволюции популяции рост со временем удельной работы сопряженного процесса ($d\bar{A}/dt > 0$, $\bar{A} = A/V$). Так как $\eta = A/\epsilon = \bar{A}/\bar{\epsilon}$ ($\bar{\epsilon} = \epsilon/V$), $d\bar{A}/dt = \eta d\bar{\epsilon}/dt + \bar{\epsilon} d\eta/dt$, то условие прогрессивной эволюции популяции может выполняться на основе увеличения как используемой энергии ($d\bar{\epsilon}/dt > 0$), так и при КПД сопряженного процесса ($d\eta/dt > 0$). В силу ограниченности источников пищи вполне вероятно, что основной движущей силой эволюции животных был рост КПД сопряженного процесса, а не потребляемой энергии. Действительно, эволюция протекала путем естественного отбора, выживания наиболее приспособлен-

ных к среде обитания организмов [8]. Количественной характеристикой приспособляемости организмов к среде обитания по существу и является КПД сопряженного процесса (4.7).

Величину η будем считать количественной характеристикой эволюции популяции: чем больше η , тем на более высоком уровне эволюционного развития находится популяция. При прогрессивной эволюции возрастает со временем КПД сопряженного процесса концентрирования рассеянного органического вещества:

$$d\eta/dt > 0, \quad \eta = A/\epsilon. \quad (5.35)$$

При этом увеличивается неравновесность популяции по отношению к окружающей среде или растет эффективность ее функционирования.

Процессы концентрирования вещества при участии водных растворов широко распространены в природных процессах (например, при рудообразовании путем мобилизации рассеянного рудного вещества горных пород). Выражение для работы (A_0) концентрирования 1 г-моля вещества в процессе, протекающем термодинамически обратимо, имеет вид

$$A_0 = RT \ln(q_{\max}/q_0), \quad (5.36)$$

где q_{\max} и q_0 — концентрация вещества в системе и окружающей среде.

Допустим, что уравнение (5.36) приближенно описывает процесс концентрирования рассеянного органического вещества, протекающий при функционировании популяции¹. С учетом (5.36) выражение (5.34) для КПД запишем следующим образом.

$$\eta = \frac{nRT}{\epsilon} \ln \frac{q_{\max}}{q_0}. \quad (5.37)$$

Здесь n — число грамм-молей вещества, концентрируемое за время t . Допустим, что эта величина пропорциональна превышению концентрации рассеянного органического вещества в источнике над некоторой фоновой концентрацией (q_ϕ), ниже которой существование популяции невозможно:

$$n = \alpha(q_0 - q_\phi). \quad (5.38)$$

Тогда выражение для КПД примет вид

$$\eta = \gamma(q_0 - q_\phi) \ln(q_{\max}/q_0), \quad \gamma = \alpha T/\epsilon, \quad (5.39)$$

где γ — величина, независимая от q_0 .

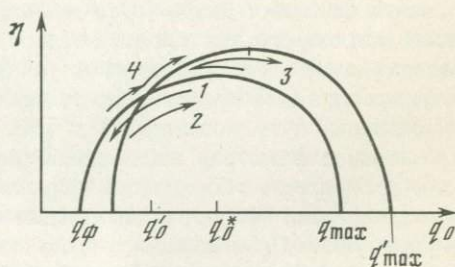
Пусть $q_0 = q_0(t)$ — переменная концентрация "рассеянного" органического вещества в источнике. Так как $d\eta/dt = d\eta/dq_0 \cdot dq_0/dt$, то имеем два уже отмеченных выше типа эволюции (рис. 13): 1) $d\eta/dq_0 > 0, dq_0/dt > 0$ — эволюция роста при увеличении концентрации вещества в источнике (от q_ϕ до $q_0^* = q_{\max}/e, e = 2,718\dots$), когда происходит преимущественно увеличение массы (численности) популяции; 2) $d\eta/dq_0 < 0, dq_0/dt < 0$ — эволюция прогресса при уменьшении концентрации вещества в источнике

¹ Указанное допущение выполняется, если процесс концентрирования вещества протекает термодинамически обратимо. Этот случай следует рассматривать как предельный, идеализированный, так как в действительности процессы концентрирования вещества как в неживой, так и в живой природе необратимы.

(от q_{\max} до q_0^*). В этом случае популяция отвечает на уменьшение концентрации "пищи" ($dq_0 < 0$) совершенствованием, эволюцией ($d\eta > 0$) сопряженного процесса ее добычи. Эволюция прогресса имеет, по-видимому, основное значение для эволюции животного мира. Действительно, новые виды животных образовывались из относительно небольших форм, в то время как крупные формы (для линии эволюции которых $dq_0/dt > 0$) вымирали.

Из модели следует, что фактором эволюции является изменение концентрации рассеянного органического вещества (пищи) в источнике. При постепенно уменьшающейся концентрации популяция прогрессивно эволюционирует, когда она осваивает новые виды пищи, новые территории и т.п. По достижении критической концентрации q_0^* начинается регресс, постепенное уменьшение численности популяции из-за нехватки пищи.

Рис. 13. Зависимость КПД процесса функционирования популяции от концентрации рассеянного органического вещества
1-4 - разные пути эволюции (пояснение см. в тексте)



Попытаемся в рамках развитой модели объяснить образование новых прогрессивных видов. Каждый вид характеризуется своей зависимостью $\eta(q_0)$. Для более прогрессивного вида вместо (5.39) имеем

$$\eta' = \gamma(q_0 - q'_\phi) \ln(q'_{\max}/q_0), \quad (5.40)$$

причем $q'_{\max} > q_{\max}$. Последнее означает, что популяция с КПД η' более неравновесна по отношению к окружающей среде, чем с η , т.е. более прогрессивна.

Эволюцию схематически можно представить следующим образом (см. рис. 13). При уменьшении q_0 вид с КПД $\eta(q_0)$ прогрессивно эволюционирует. Однако при $q_0 = q_0^*$ прогрессивная эволюция сменяется на регрессивную: пищевых ресурсов не хватает, и численность вида начинает уменьшаться (путь эволюции 1). Если в дальнейшем условия среды снова станут благоприятными ($dq_0/dt > 0$), то вид начнет прогрессировать, увеличивая свою численность (эволюция роста по пути 2). Таким образом обеспечивается длительное существование отдельных видов при периодически изменяющихся условиях внешней среды.

Однако эта ситуация тривиальна. Новый же вид образуется, если при каком-либо значении $q_0 = q_0'$ (см. рис. 13) произойдет "благоприятная" мутация, обеспечивающая формирование видоизмененных особей, более приспособленных к окружающей среде. Последнее означает, что для этих особей условия среды становятся более благоприятными, и они начинают размножаться. В рамках модели это означает развитие по пути 3 (см. рис. 13). Мутация обеспечивает положительный скачок производной η от

q_0 в точке q'_0 (от $d\eta(q'_0)/dq_0$ до $d\eta'(q'_0)/dq_0$), а окружающая среда — благоприятные условия для видоизмененных особей (например, в связи с переходом на новый источник пищи, концентрация которой в силу каких-либо причин возрастает, или освоением все большего числа новых видов пищи). Отметим, что указанная схема видообразования реализуется, если кривые $\eta(q_0)$ и $\eta'(q_0)$ пересекаются (в точке q'_0 , см. рис. 13). Для этого необходимо выполнение условия $q'_\Phi > q_\Phi$.

Указанная схематизация проясняет роль фактора окружающей среды при видообразовании. Образование новых видов возможно при неблагоприятных условиях окружающей среды для старого вида и благоприятных для нового (путь эволюции 3). В этом варианте новый вид формируется на фоне массового отмирания старого (если для последнего условия окружающей среды продолжают необратимо ухудшаться). В принципе возможен другой вариант при благоприятных условиях внешней среды как для старого, так и для нового вида (путь эволюции 4). Здесь обеспечивается сохранность как старого, так и нового вида.

Палеонтологические данные зачастую свидетельствуют о том, что образование новых видов происходило на фоне массового отмирания старых — реализовывался путь эволюции 3 (см. рис. 13).

При анализе факторов эволюции животного мира необходимо в дальнейшем рассмотреть зависимость энергетики основного процесса биологического окисления (4.8) от концентрации кислорода в атмосфере. Поскольку концентрация O_2 менялась со временем [2, 3], то величина ϵ , а следовательно, и η также зависят от времени. Следовательно, имеется еще один фактор эволюции животного мира — изменение со временем концентрации кислорода в атмосфере [2].

В заключение отметим, что рассмотренная концепция эволюции в терминах работы (свободной энергии) и энергии в определенной степени может быть противопоставлена существующим попыткам использовать термодинамику необратимых процессов для описания функционирования и эволюции биологических объектов в терминах энтропии (начиная с широко известной работы Э. Шредингера [51]). Энтропийный подход не учитывает того кардинального факта, что функционирование живого организма сводится к извлечению с пищей "запаса" свободной энергии, а не запаса упорядоченности, характеризующей энтропией [32].

ВУЛКАНИЗМ И ЖИЗНЬ

Проблема "вулканизм и жизнь", уже частично затронутая, имеет несколько важных аспектов: вулканизм и синтез биологически ценных соединений, вулканизм и динамическая организация предбиологических систем, вулканизм и сохранение жизни, вулканизм и эволюция жизни.

Чтобы жизнь возникла, необходим "строительный материал" — биологически значимые молекулы. Их надо определенным образом "организовать" в системы, обладающие признаками живых. Жизнь стала такой, как мы ее наблюдаем, лишь при условии самосохранения биологических систем и их эволюции. Все эти необходимые атрибуты жизни могут быть проанализированы с единой точки зрения — на основе сопряженных про-

цессов, причем в роли единого источника вещества и энергии выступает вулканизм.

Выполнены многочисленные эксперименты по превращению простейших молекул (CH_4 , NH_3 , H_2O и др.) в более сложные соединения (цианистый водород, аминокислоты и другие органические соединения), на основе которых образуются биополимеры — строительный материал жизни. Такие превращения осуществляются при воздействии на простые смеси электрических разрядов, ионизирующего излучения, высоких температур (от 600 до $2 \cdot 10^3$ °K) и т.п. [44].

Указанные исходные вещества для синтеза являются составными частями газов, выделяющихся при извержениях вулканов (куда входят H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O , NH_3 , H_2S , SO_2 и др.). Интервал температур при вулканических извержениях также велик (от температуры окружающей среды до 1000°С). Поэтому вполне вероятным является синтез сложных органических молекул, причем спектр возможных продуктов синтеза, по-видимому, более широк, чем в модельных экспериментах. Имеются прямые данные о наличии органических соединений (аминокислот) в пеплово-газовой вулканической туфе, образовавшейся при извержении вулкана Тятя на о-ве Кунашир в 1973 г. [24].

Можно констатировать, что вероятные пути синтеза биологически ценных молекул на Земле в далеком прошлом во многом ясны [44]. Так, эти соединения могли образоваться под действием электрических разрядов и ультрафиолетового излучения Солнца на газы первичной атмосферы Земли, при извержениях вулканов. Куда более сложной (и это признают многие исследователи) является проблема организации синтезированных органических молекул в предбиологические системы. Более того, не совсем ясно, что такое вообще предбиологические системы.

Предбиологическими естественно считать такие системы, которые обладают рядом существенных свойств, характерных для биологических объектов. Однако весьма затруднительно указать перечень необходимых свойств такого рода, тем более что их число в процессе предбиологической эволюции, конечно, возрастало. Автор не берется указать, где конкретно та граница, при переходе через которую из неживого возникло живое. Этот переход, по-видимому, был постепенным и длительным. Но вместе с тем из изложенного выше следует, когда и где могли возникать системы, уже изученные на настоящее время, которые обладают существенными признаками биологических. Такие системы на основе органических соединений, синтезированных в вулканах (в приповерхностных очагах расплавленных пород), организовывались на подвижных геохимических барьерах в термальных потоках.

При этом разрешается одна из кардинальных проблем предбиологической эволюции — концентрирования органических молекул, пространственной локализации химических реакций [29]. Ибо концентрации синтезированных на первичной Земле органических молекул не могли быть большими (из-за огромного объема гидросферы и атмосферы), а главное, они не могли поддерживаться высокими в течение длительного времени (из-за процессов массопереноса: диффузии, конвекции и др.), по-видимому необходимого для их самоорганизации. Конкретный способ органи-

зации возможных предбиологических систем на подвижных геохимических барьерах уже обсуждался (гл. 3).

Роль вулканизма в сохранении и эволюции жизни на Земле следует из моделей геохимического цикла углерода и эволюции биосферы. Этот вопрос специально обсуждался в гл. 5, поэтому остановимся на нем лишь кратко.

На основе изучения эволюции осадочной оболочки Земли в фанерозое А.Б. Ронов [40] сформулировал геохимический принцип сохранения жизни, согласно которому жизнь возможна лишь до тех пор, пока происходит (путем вулканических процессов) обмен энергией и веществом (углекислым газом особенно) между глубинами Земли и ее поверхностью. Математическая модель геохимического цикла углерода, с учетом его поступления из эндогенного источника при вулканических процессах, дает аналитические зависимости массы углерода от времени в живом и захороненном биогенном веществе и в атмосфере.

При отсутствии поступления CO_2 из глубинного источника масса углерода живого вещества и атмосферы асимптотически ($t \rightarrow \infty$) стремится к нулю из-за необратимого ухода его из цикла в захороненное биогенное вещество и осадочные породы, что асимптотически и означает прекращение жизни. Чтобы этого не произошло, необходимо периодическое (или постоянное) поступление CO_2 из глубинного источника, что и обеспечивают вулканические процессы. Модель подтверждает на количественной основе геохимический принцип сохранения жизни А.Б. Ронина [40].

Эволюция растительного мира биосферы, как следует из развитой модели (см. гл. 5), обусловлена повторяющимися периодами локального увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере в эпохи тектономагматической жизни, происходящего на общем фоне снижения концентрации CO_2 .

Через изменение концентрации CO_2 в атмосфере вулканические процессы контролировали эволюцию растительного мира. Изменяя среду жизнеобитания (в терминах модели — концентрацию рассеянного вещества Земли), вулканизм явился одной из движущих сил эволюции животного мира, по-видимому, способствовал превращению обезьяны в человека [33] и оказал определенное влияние на эволюцию человеческого общества.

Г Л А В А 6

ЭВОЛЮЦИЯ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ С СОПРЯЖЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Открытые системы с сопряженными процессами широко распространены на Земле и имеют самую разную природу. К ним относятся уже обсуждавшиеся выше геохимические и биологические системы. Ноосфера — поверхностная область Земли, в которой осуществляется геохимическая деятельность человека, протекает процесс взаимодействия человек—геосфера, — также является открытой системой с сопряженными процессами, обменивающейся веществом и энергией с окружающей средой.

Действительно, ноосфера не равновесна относительно окружающей среды. Будучи лишена обмена веществом и энергией с ней, она неизбежно деградирует, а ее структуры разрушаются. Многие процессы внутри ноосферы также относятся к сопряженным, например концентрирование населения в городах, богатства в руках отдельных лиц и т.п.

Несмотря на всю специфику каждой из такого рода систем, их объединяет наиболее существенный общий признак: функционирование благодаря сопряжению процессов, при котором работа несомопроизвольных процессов концентрирования разного рода осуществляется основным самопроизвольным процессом. Поэтому должны существовать общие закономерности эволюции такого рода систем вне зависимости от их природы.

КРИТЕРИЙ ЭВОЛЮЦИИ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ

При обсуждении проблемы эволюции необходимо рассматривать эволюцию как систем, так и сопряженных процессов, на основе которых функционируют системы. За условие прогрессивной эволюции системы можно принять рост со временем удельной свободной энергии системы (отнесенной к единице объема системы V) [10, 17, 41]:

$$d\bar{F}'/dt > 0, \quad \bar{F}' = F'/V. \quad (6.1)$$

Этот критерий отражает в обобщенной форме усложнение структуры системы. Однако рассчитать абсолютное значение удельной свободной энергии нельзя. Это ограничивает возможность практического использования этого критерия эволюции.

Выше была отмечена возможность использовать в качестве критерия прогрессивной эволюции системы рост со временем удельной работы сопряженного процесса, т.е.

$$d\bar{A}/dt > 0, \quad \bar{A} = \Delta \bar{F}', \quad \Delta \bar{F}' = \Delta F'/V. \quad (6.2)$$

Действительно, величина A совпадает с количеством "сконцентрированной" в единице объема системы свободной энергии (которая может быть превращена в "полезную" работу). Чем больше A , тем более неравновесна система по отношению к окружающей среде, тем больше энергии основного процесса сконцентрировано в единице объема и соответственно тем на более высоком уровне эволюционного развития находится система.

Так как $\bar{A} = \eta \bar{\epsilon}$, $d\bar{A}/dt = \eta d\bar{\epsilon}/dt + \bar{\epsilon} d\eta/dt$, то условие (6.2) прогрессивной эволюции системы может реализоваться на основе роста как используемой энергии ($d\bar{\epsilon}/dt > 0$), так и КПД ($d\eta/dt > 0$). Если эволюция системы реализуется в основном на основе роста используемой энергии, то такой тип развития можно назвать экстенсивным. Наоборот, когда эволюция системы реализуется в основном на основе роста КПД, то имеем дело с интенсивным развитием.

С увеличением используемой энергии слагаемое $\bar{\epsilon} d\eta/dt$ в выражении $d\bar{A}/dt$ растет. Поэтому влияние роста энергии (слагаемого $\eta d\bar{\epsilon}/dt$) на эволюцию системы со временем уменьшается. Существуют также объективные ограничения роста величины $\bar{\epsilon}$, связанные, например, с ограниченностью источников пищи (при эволюции животных) или энер-

гетических ресурсов (при эволюции ноосферы), а также с существованием предела диссипации энергии. Поэтому в общем случае представляется неизбежным при росте используемой энергии переход систем с экстенсивного на интенсивный путь развития.

Что же является определяющим в эволюции систем — рост используемой энергии или КПД? По-видимому, и то и другое, но на разных этапах развития преализует один из этих факторов. На экстенсивном этапе развитие реализуется на основе роста используемой энергии, тогда как КПД может даже уменьшаться. Наоборот, на интенсивном этапе развитие реализуется на основе роста КПД, тогда как рост используемой энергии незначителен или вовсе отсутствует. Если КПД на экстенсивном этапе уменьшается, то переход на интенсивное развитие может оказаться "болезненным", привести к гибели наиболее уязвимых систем.

Рассмотрим некоторые факторы эволюции системы на основе критерия (6.2). Пусть сопряженный процесс заключается в концентрировании вещества от концентрации q_0 в источнике до q_{\max} в системе. Свободная энергия концентрирования 1 г-моля вещества есть

$$\Delta F'_0 = RT \ln (q_{\max}/q_0). \quad (6.3)$$

Принимая простое допущение (по аналогии с процессом концентрирования на подвижном геохимическом барьере), что масса концентрированного за определенное время вещества пропорциональна его концентрации в источнике, найдем

$$\begin{aligned} \Delta \bar{F}' &= \frac{nRT}{V} \ln \frac{q_{\max}}{q_0} = \alpha n_0 q_0 \ln \frac{q_{\max}}{q_0} = \\ &= \frac{\alpha \epsilon q_0}{\epsilon_0} \ln \frac{q_{\max}}{q_0}, \quad \alpha = \frac{RT}{V}, \end{aligned} \quad (6.4)$$

где $\epsilon_0 = \epsilon/n$ — приведенные энергетические затраты на единицу массы концентрированного вещества (при неизменной концентрации вещества в источнике, равной единице, $q_0 = 1$).

Проанализируем реализацию прогрессивной эволюции при изменении концентрации вещества в источнике. Дифференцируя (6.4) по t , найдем

$$\frac{d \Delta \bar{F}'}{dt} = \alpha \left(\ln \frac{q_{\max}}{q_0} - 1 \right) \frac{dq_0}{dt}. \quad (6.5)$$

Тогда имеем два принципиально разных типа прогрессивной эволюции системы при переменном источнике вещества, формирующего систему (но не энергии, что уже рассматривалось): эволюция роста и эволюция прогресса. Первый тип прогрессивной эволюции имеет место при росте концентрации формирующего систему компонента в источнике (CO_2 для фотосинтезирующих объектов, рудного компонента для рудообразующей системы и др.) в интервале $0 < q_0 < q_{\max}/e$. При этом происходит преимущественно рост системы, увеличение ее массы. Второй тип эволюции прогресса имеет место при уменьшении концентрации вещества в источнике в интервале от q_{\max} до q_{\max}/e . В этом случае рост величины $\Delta \bar{F}'$ происходит за счет прогрессивной эволюции сопряженного процесса —

уменьшения энергетических затрат на единицу массы концентрированного вещества.

Общие закономерности эволюции открытых систем сформулируем следующим образом. К эволюционирующим относятся открытые системы с сопряженными процессами. При прогрессивной эволюции системы возрастает удельная работа сопряженного процесса. Экстенсивное развитие реализуется на основе увеличения используемой энергии, а интенсивное — на основе роста КПД сопряженного процесса. Один из главных факторов прогрессивной эволюции системы — уменьшение концентрации формирующих систему компонентов в источнике.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ СОПРЯЖЕННОГО ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ВЕЩЕСТВ

Рассмотрим сопряженный процесс концентрирования смеси веществ (протекающий термодинамически обратимо). Выражение для свободной энергии концентрирования 1 г-моля i -вещества есть

$$\Delta F'_{i0} = RT \ln \frac{q_{i\max}}{q_{i0}}, \quad (6.6)$$

где q_{i0} и $q_{i\max}$ ($q_{i\max} > q_{i0}$) — концентрация i -вещества в источнике и системе.

Принимая (по аналогии с процессами концентрирования на подвижном геохимическом барьере) простое допущение, что масса концентрируемого за определенное время вещества пропорциональна концентрации этого вещества в источнике:

$$n_i = n_0 q_{i0}, \quad (6.7)$$

получим следующее выражение для КПД концентрирования смеси веществ:

$$\eta = \gamma \sum_{i=1}^n q_{i0} \ln \frac{q_{i\max}}{q_{i0}}, \quad (6.8)$$

где $\gamma = n_0 RT / |\Delta F|$ — величина, не зависящая от q_{i0} .

В данном случае условие (6.5) прогрессивной эволюции может выполняться при различных вариантах изменения концентрации q_{i0} со временем. Поэтому в общем случае уже нельзя говорить о тех двух предельных типах эволюции (роста и прогресса), которые отмечены выше.

Вместе с тем эти два предельных типа эволюции имеют, на наш взгляд, общий характер и также применимы к рассматриваемому случаю концентрирования смеси веществ. Рассмотрим формальный прием, который позволяет свести задачу концентрирования смеси к концентрированию одного "эффективного" вещества. Для этого введем два обобщенных параметра: концентрацию q_0 рассеянного вещества и концентрацию q_{\max} концентрированного вещества. Концентрация q_0 характеризует в обобщенной, эффективной форме вещество источника, а q_{\max} — вещество системы. Положим, что существуют соотношения

$$q_{i0} = a_i q_0, \quad q_{i\max} = a_i q_{\max}, \quad (6.9)$$

где a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) — постоянные величины, не зависящие от q_0 и q_{\max} .

Чем меньше q_0 , тем "беднее" источник, а чем больше q_{\max} , тем "богаче" система — тем больше сконцентрировано в ней энергии основного процесса. Величина q_{\max} характеризует в обобщенной форме уровень организации вещества эволюционирующих систем.

С учетом (6.9) уравнение (6.8) примет вид (аналогичный случаю концентрирования индивидуального вещества; см, например, (3.2))

$$\eta = \gamma_{\Sigma} q_0 \ln \frac{q_{\max}}{q_0}, \quad \gamma_{\Sigma} = \gamma \sum_{i=1}^n a_i. \quad (6.10)$$

Поэтому предлагается рассматривать два предельных типа эволюции (роста и прогресса) при изменении концентрации вещества в источнике и в случае концентрирования смеси. Данный прием, позволяющий свести сложные сопряженные процессы к концентрированию рассеянного вещества, используется ниже при рассмотрении эволюции ноосферы.

О РОЛИ КИНЕТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ЭВОЛЮЦИИ

Мы показали, что эволюция протекает в открытых системах с сопряженными процессами, внутренне химически равновесных. Поэтому бытующее мнение об определяющей роли в эволюции кинетических, а не термодинамических закономерностей весьма односторонне (естественно, мы не отрицаем существенную роль и кинетических факторов).

Рассмотрим качественно два аспекта этого вопроса: роль конечной скорости установления равновесия в системе и соотношение скоростей изменения внешних параметров и установления равновесия.

Учет конечной скорости достижения равновесия в системе в общем случае может видоизменить закономерности эволюции, повлиять на структуру системы. Показано, однако, что закономерности динамики минералообразования на подвижном геохимическом барьере с учетом и без учета конечной скорости химических реакций асимптотически (при достаточной длительности процесса) совпадают [11]. Поэтому в рамках развитой модели закономерности геохимической эволюции с учетом конечной скорости достижения равновесия асимптотически будут аналогичными полученным на основе термодинамической модели.

Что касается соотношения скоростей изменения внешних параметров (в рассмотренной модели — концентрации формирующего систему компонента в источнике) и установления равновесия в системе, то здесь имеются два предельных случая. Когда внешние условия меняются медленнее, чем устанавливается равновесие, система приспосабливается к изменениям во внешней среде — ее равновесные состояния задаются внешними (граничными) условиями. Именно этот случай по существу и обсуждался выше. Наоборот, в противоположном случае система не успевает приспособиться к изменяющимся внешним условиям, в ней может возникнуть новая структура.

Развитая модель в принципе допускает учет конечной скорости основного и сопряженного процессов. В этом случае изменение свободной

энергии в основном процессе следует записать как

$$\Delta F = \int_{t_1}^{t_2} w \Delta F_0 dt, \text{ а в сопряженном — как } \Delta F' = \int_{t_1}^{t_2} w' \Delta F'_0 dt.$$

Здесь w и w' — скорость основного и сопряженного процессов; Δt ($\Delta t = t_2 - t_1$) — интервал времени, в котором рассматривается процесс.

Если в рамках рассматриваемой квазиравновесной термодинамической модели эволюции зависимость количественных характеристик эволюции (удельной работы и КПД сопряженного процесса) от времени имеет неявный характер (в частности, $\eta = \eta(C_0)$, $C_0 = C_0(t)$), то при учете конечных скоростей основного и сопряженного процессов эти характеристики эволюции уже явным образом зависят от времени. Это означает, что система (и сопряженный процесс) эволюционирует и в случае, когда концентрация формирующего ее компонента в источнике постоянна. При этом эволюция обусловлена самопроизвольным движением системы к внутреннему равновесию. В рамках же квазиравновесной модели система и процесс при $C_0 = \text{const}$ не эволюционируют.

Когда внешние параметры "мгновенно" меняются, квазиравновесная модель эволюции перестает "работать". При этом в системе возможны "мгновенные" качественные изменения: рождаются новые структуры, происходит "революция". Теория "революции" (в отличие от эволюции) должна основываться на учете роли кинетических факторов в развитии систем.

Образование новых структур обсуждается в теории так называемых диссипативных структур [21, 29, 35]. Образование таких структур происходит в резко неравновесных условиях, когда главную роль начинают играть флуктуации, масштабы которых становятся сопоставимыми с размерами системы. По И. Пригожину [35], диссипативная структура, по существу, гигантская флуктуация, стабилизируемая за счет обмена энергией с внешней средой. Примером возникновения диссипативной структуры может служить переход от ламинарного к турбулентному течению жидкости. В классической гидродинамике считалось, что такой переход означает переход к более хаотичному, беспорядочному движению. В рамках же теории диссипативных структур это процесс самоорганизации, ибо тепловое движение частиц преобразуется в "организованное" макроскопическое движение вихрей.

Диссипативные структуры возникают и существуют в экстремальных условиях, в системах резко неравновесных. Такая ситуация в земных условиях обычно не реализуется. Поэтому о диссипативных структурах в большинстве геохимических процессов и в биологических системах [21] говорить не приходится. Для анализа эволюции этих процессов следует использовать предложенную здесь теорию эволюции. Выяснение же роли кинетических факторов в эволюции — задача дальнейших исследований.

Понятие ноосферы как современной стадии, геологически переживаемой биосферой, впервые ввел в 1927 г. французский математик Е. Ле Руа, пришедший к этому представлению совместно с геологом Т. де Шарденом (см. [7]). Затем В.И. Вернадский разработал основы учения о ноосфере [5–7]. В последнее время в связи с возникновением глобальных проблем учение о ноосфере интенсивно развивается [13, 19, 20, 30, 34, 36, 39].

Вероятно, ни одно другое понятие не имеет столь разноречивых толкований, как понятие о ноосфере. Ряд авторов считают, что у этого понятия еще нет строгого научного определения (однако это не мешает обсуждению ими проблем ноосферы), другие вводят свои определения, третьи наряду с ноосферой вводят новые понятия (социосфера, антропосфера, техносфера и др.). Столь же разнородны представления о времени возникновения ноосферы (уже существует, наступит в отдаленном будущем), о ее границах, свойствах и т.п.

Такие разночтения во многом обусловлены тем, что сам В.И. Вернадский, по существу, успел дать лишь введение в учение о ноосфере. Обратимся непосредственно к В.И. Вернадскому. "Ноосфера есть новое геологическое явление на нашей планете. В ней впервые человек становится крупнейшей геологической силой... Ноосфера — последнее из многих состояний эволюции биосферы в геологической истории — состояние наших дней" [5, с. 328]. "Лик планеты — биосферы — химически резко меняется человеком сознательно и главным образом бессознательно" [5, с. 329]. Во время меловой системы и особенно третичной "впервые создались в биосфере наши зеленые леса, всем нам родные и близкие. Это другая большая эволюционная стадия, аналогичная ноосфере" [7, с. 357]. "Можно считать, что в пределах 5–7 тыс. лет, все увеличиваясь в темпах, идет непрерывное создание ноосферы и прочно — в основном без движения назад, но с остановками, все уменьшающимися в длительности, — идет рост культурной биогеохимической энергии человечества" [6, с. 108]. "Биосфера перешла или, вернее, переходит в новое эволюционное состояние — в ноосферу, перерабатываемую научной мыслью социального человечества" [6, с. 21].

На основе приведенных цитат предлагаются следующие достаточно непротиворечивые заключения. Ноосфера — область, сфера человеческой деятельности, часть преобразованной этой деятельностью биосферы. Ноосфера является подсистемой более общей системы — биосферы, она занимает часть пространства, занятого биосферой, являясь, таким образом, подсистемой включения [10]. Ноосфера возникла вместе с человеком, ее границы непрерывно растут. Можно выделить этапы развития ноосферы, например, такие, как неразвитая ноосфера, когда преобладает бессознательное воздействие человека на природу, и развитая ноосфера. Переход биосферы в ноосферу означает, что деятельность человека охватывает уже всю биосферу, а границы биосферы и ноосферы совпадают.

Сделанные заключения отвечают представлениям диалектического материализма о формах движения материи. Как показал Ф. Энгельс в "Диалектике природы", формы движения материи развиваются одни из других и в процессе развития одни формы переходят в другие. Вместе

с тем при возникновении высшей формы движения из низшей последняя не уничтожается, не исчезает, а входит в эту высшую форму в "снятом" виде, побочно [18]. Более того, высшая форма движения невозможна без низшей, т.е. она сопряжена с ней. Так, тепловая форма движения невозможна без механической (движения частиц), социальная — без биологической и т.п.

Возникновение высшей формы движения также не означает элиминацию систем, в которых реализуется низшая форма. Такие системы продолжают функционировать. Более того, с ними сопряжены системы, в которых реализуется высшая форма. Появление человека и означало возникновение на основе биологической новой социальной формы движения материи, сопряженной с первой. Ноосфера — пространственная область, система, в которой реализуется, превалирует социальная форма движения. Биосфера — система, в которой реализуется, превалирует биологическая форма. Эти системы генетически и структурно связаны, неразделимы — без биосферы невозможна и ноосфера.

Это соображение, по-видимому, и явилось главным при развитии концепции коэволюции — совместной эволюции — природы и общества. Данная концепция вначале сформировалась за рубежом, в нашей стране она наиболее последовательно развивается Н.Н. Моисеевым [25–27]. Принципиальной разницы между этой концепцией и ноосферной В.И. Вернадского, по существу, нет. Ибо и концепция коэволюции предполагает совместное взаимообусловленное развитие природы и общества, т.е. имеет в виду воздействие человека на природу.

Итак, будем понимать под ноосферой область, сферу человеческой деятельности. При этом будем иметь в виду, что современное ее состояние отвечает неразвитой, разьединенной ноосфере. Ноосфера является открытой системой, обменивающейся веществом и энергией с окружающей средой. Она неравновесна относительно среды; будучи лишена обмена веществом и энергией с ней, она неизбежно деградирует, а ее структуры разрушатся.

Человеческая деятельность весьма разнообразна. Несмотря на всю ее сложность, можно рассмотреть предельную упрощенную модель, которая отражала бы количественно энергетический (термодинамический) аспект функционирования ноосферы. Итак, ограничимся на первом этапе рассмотрением лишь той части человеческой деятельности, которая сводится к товарному производству, получению общественного продукта.

Будем рассматривать ноосферу как открытую систему, в которой осуществляется основной процесс утилизации энергетических ресурсов Земли (запасов угля, нефти, гидроресурсов и т.п.) и сопряженный с ним процесс получения общественного продукта из рассеянного вещества (органического и неорганического) Земли. Основной процесс может осуществляться в отсутствие сопряженного, в то время как сопряженный — лишь на фоне основного. Действительно, получение общественного продукта связано с производством работы за счет энергии основного процесса.

Рассмотрим процесс получения общественного продукта формально как концентрирование "рассеянного вещества" Земли от концентрации q_0 в источнике до q_{\max} (состояния "концентрированного вещества") в системе.

Допустим, что уравнение (6.3) описывает искусственные процессы "концентрирования" вещества (получения общественного продукта), осуществляемые человеком. В действительности как естественные, так и искусственные процессы концентрирования вещества необратимы, а системы, в которых они протекают, неидеальны. Поэтому, сохраняя уравнение (6.3) для работы получения общественного совокупного продукта, мы придаем величине q_{\max} эффективный характер (подобно тому, как это делается, например, в химической термодинамике, когда для описания реальных систем вводится в уравнения идеальных эффективная концентрация — активность [16]). Увеличение q_{\max} со временем характеризует в обобщенной форме рост уровня организации вещества ноосферы.

Тогда уравнение (6.4) характеризует удельную работу сопряженного процесса ноосферы — получения общественного продукта. Дифференцируя (6.4) по времени, найдем (при условии $q_{\max} \gg q_0$, соответствующем существенной неравновесности ноосферы по отношению к окружающей среде)

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\bar{F}'}{dt} = & \frac{\alpha q_0}{\epsilon_0} \ln \frac{q_{\max}}{q_0} \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{\alpha q_0 \epsilon}{q_{\max} \epsilon_0} \frac{dq_{\max}}{dt} + \frac{\alpha \epsilon}{\epsilon_0} \ln \frac{q_{\max}}{q_0} \frac{dq_0}{dt} - \\ & - \frac{\alpha q_0 \epsilon}{\epsilon_0^2} \ln \frac{q_{\max}}{q_0} \frac{d\epsilon_0}{dt}. \end{aligned} \quad (6.11)$$

Проанализируем факторы эволюции ноосферы на основе условия (6.2) прогрессивного развития и выражения (6.11). При этом учтем следующее обстоятельство. Развиваемая модель эволюции предполагает, что между структурой ноосферы, характеризуемой величиной q_{\max} , и количеством используемой энергии ϵ существует определенная функциональная зависимость, причем с ростом ϵ растет и величина q_{\max} — структура ноосферы усложняется (т.е. $q_{\max} = f(\epsilon)$, $dq_{\max}/d\epsilon > 0$).

На основе сформулированных выше двух типов эволюции (в зависимости от изменения концентрации "рассеянного вещества" Земли) можно сделать применительно к ноосфере следующие заключения. Главная линия прогрессивной эволюции ноосферы обусловлена уменьшением со временем концентрации "рассеянного вещества" Земли ($dq_0/dt < 0$) вследствие постепенного уменьшения сырьевых ресурсов, истощения почвы и т.д. Функционирование ноосферы неизбежно сопровождается уменьшением природных ресурсов. Чтобы при этом прогресс ноосферы имел место (в (6.11) $d\Delta\bar{F}'/dt > 0$), необходимы соответствующий рост используемой энергии и (в общем случае) уменьшение приведенных энергетических затрат на единицу общественного продукта, компенсирующие влияние уменьшения природных ресурсов.

Эволюция ноосферы имеет характер самодвижения. Уменьшение природных ресурсов приводит к необходимости роста используемой энергии на экстенсивном этапе развития и к уменьшению приведенных удельных энергетических затрат — на интенсивном. Рост потребляемой энергии ($d\epsilon/dt > 0$) — специфическая особенность функционирования ноосферы, отличающая ее от ряда сопряженных процессов неживой и живой природы.

Естественно, рост энергии сам по себе еще не фактор прогресса, он становится им лишь тогда, когда сопровождается необходимым ростом работы сопряженного процесса.

С течением времени эволюция ноосферы может ускоряться ($d^2 \bar{F}'/dt^2 > 0$), замедляться ($d^2 \bar{F}'/dt^2 < 0$) или быть стационарной ($d^2 \bar{F}'/dt^2 = 0$). Это зависит, в частности, от скорости изменения концентрации вещества в источнике (dq_0/dt), а также от величины $d^2 q_0/dt^2$. Таким способом можно интерпретировать роль катастрофических изменений внешней среды (вследствие засух, оледенений, извержений вулканов и т.п.) в эволюции ноосферы. Действительно, в результате стихийного бедствия концентрация "рассеянного вещества" Земли резко падает ($dq_0/dt < 0, d^2 q_0/dt^2 < 0$), и в зависимости от конкретных условий эволюция может либо замедляться, либо ускоряться.

Общие закономерности эволюции ноосферы сформулируем следующим образом. Ноосфера относится к открытой эволюционирующей системе, в которой осуществляется процесс получения общественного продукта из "рассеянного вещества" Земли, сопряженный с утилизацией энергетических ресурсов Земли. При прогрессивной эволюции ноосферы возрастает удельная работа сопряженного процесса. Главный, постоянно действующий фактор эволюции — уменьшение концентрации "рассеянного вещества" Земли, обуславливающее рост используемой энергии.

О ПРОШЛОМ И НАСТОЯЩЕМ НООСФЕРЫ

В рамках развитой модели одной из причин эволюции ноосферы является, по существу, ограниченность природных ресурсов вообще и каждой страны в частности. От этого зависит ограниченность общего количества материальных благ. Их распределение внутри общества определяется его структурой, социальным устройством. От структуры ноосферы зависит, как протекает ее эволюция. В капиталистическом обществе, как показывает марксизм—ленинизм, эволюция реализуется путем классовой борьбы.

Приложение общих закономерностей эволюции ноосферы к интерпретации конкретных фактов развития ноосферы в прошлом и настоящем — задача не простая. Попытаемся обсудить некоторые возможные направления таких приложений, допуская развитие ноосферы по двум направлениям (в рамках развитого термодинамического подхода): эволюция роста и эволюция прогресса.

Развитие по типу эволюции роста происходит в наиболее благоприятных условиях увеличения со временем концентрации рассеянного вещества, необходимого для функционирования ноосферы (продуктов питания, минерального сырья и т.п.). Эволюция роста приводит по преимуществу к росту массы концентрированного вещества ноосферы (обобщенного продукта общественного производства) при относительно слабом прогрессе (социальном и/или техническом).

Развитие по типу эволюции прогресса, наоборот, происходит на фоне неблагоприятных условий внешней среды — уменьшения концентрации рассеянного вещества. Оно сопровождается быстрым прогрессом.

Допущение двух указанных типов эволюции является упрощением реального процесса развития, неизбежным при моделировании. Однако

такой подход вполне оправдан для выяснения тенденций влияния природного фактора на эволюцию ноосферы.

Становление гоминид. Данный процесс связан с утверждением специфической формы взаимодействия предшественников человека с окружающей средой — орудийной деятельности [33]. В рамках модели это означало увеличение КПД сопряженного процесса концентрирования рассеянного органического вещества Земли гоминидами (по сравнению с животными), прогрессивную эволюцию процесса "добычи пищи". Сначала эволюция протекала в основном путем расширения пищевых ресурсов при переходе к всеядному питанию (не только за счет биомассы фауны, но и флоры). Это приводило к росту концентрации необходимого для жизни рассеянного органического вещества. Становление гоминид на начальном этапе происходило, по-видимому, по типу эволюции роста, когда в достаточно благоприятных условиях географической среды происходил рост численности слабо прогрессирующих гоминид. Прогресс был медленный, эволюция часто прерывалась стихийными бедствиями, при которых, как следует из модели, прогрессивная эволюция сменялась на регрессивную: гоминидам не хватало пищевых ресурсов и они вымирали. Именно поэтому в генеалогическом дереве человека имеется много отмерших ветвей. Наконец, совершенствование орудийной деятельности гоминид привело к такому увеличению КПД сопряженного процесса, при котором стихийные бедствия уже ускоряли прогресс гоминид.

Возникновение и эволюция классового общества. Возникновение классового общества неразрывно связано с появлением воспроизводящих форм хозяйства [33]. Функционирование (производительная деятельность) общества в основном сводится к земледелию без использования машин. Основным процессом при этом по-прежнему остается биологическое окисление пищевых продуктов у человека (корма у домашних животных).

Благодаря земледелию резко возросла масса концентрированного вещества (пищи), потребляемого в основном процессе, что в рамках модели означает резкий рост величины ϵ . Термодинамическая модель эволюции предполагает прямую связь между ϵ и q_{\max} : с ростом ϵ растет и величина q_{\max} . Последнее означало усложнение структуры формирующейся ноосферы, реализуемых в ней процессов, увеличение неравновесности ее по отношению к окружающей среде. Причина усложнения структуры общества, в том числе, вероятно, появления классов, — наличие благодаря земледелию избыточных пищевых ресурсов. Как только они появляются, так (в соответствии с развиваемой моделью эволюции) на их фоне возникают сопряженные подсистемы — классы, утилизирующие избыточный продукт.

Что касается причин возникновения земледелия, то в рамках модели это недостаточность присваивающего хозяйства, обусловленная ухудшающимися условиями природной среды (постепенным истощением объектов собирательства) и увеличением численности людей. При этом концентрация рассеянного вещества падала (в (6.11) $dq_0/dt < 0$). Чтобы при этом прогресс имел место, необходим рост величины ϵ (в (6.11) $d\epsilon/dt > 0$). Это и реализовывалось путем перехода к воспроизводящему хозяйству. Если же истощение объектов собирательства не происходило, то переход

к воспроизводящему хозяйству и возникновение классов не имели места.

Природные факторы становления ноосферы (при воспроизводящем хозяйстве) предлагается трактовать как следствие периодического изменения природных условий: их улучшения ($dq_0/dt > 0$) и последующего ухудшения ($dq_0/dt < 0$). При земледелии величины q_0 и q_{\max} можно условно сопоставить с удельной массой (отнесенной на душу населения) посеянных зерновых и собранного урожая. При благоприятных изменениях природных условий (главным образом климата [33]) имеем $dq_0/dt > 0$ и $dq_{\max}/dt > 0$, а поэтому и $de/dt > 0$. Тогда прогресс (условие (6.2)) реализуется без уменьшения приведенных удельных энергетических затрат или даже с их увеличением (в (6.11) $d\epsilon_0/dt \geq 0$). Наоборот, при неблагоприятных изменениях природных условий прогресс мог реализоваться только при уменьшении приведенных энергетических затрат на единицу продукта (в (6.11) $d\epsilon_0/dt < 0$) путем совершенствования приемов ведения хозяйства.

При последующем наступлении благоприятных времен человек не забывал приемы хозяйствования, которыми он пользовался в неблагоприятное время (благодаря которым в (6.11) $d\epsilon_0/dt < 0$). И труд становился более эффективным, чем в предыдущий этап благоприятных условий. И хотя в неблагоприятное время прогресс замедлялся, но именно благодаря предшествующему неблагоприятному этапу ускорялся прогресс в следовавший за ним благоприятный этап. Многократное повторение периодов с неблагоприятными и благоприятными природными условиями обусловило необратимый прогресс, становление ноосферы.

Существует точка зрения, что упадок и гибель ряда древних цивилизаций были обусловлены внутренними причинами: разложением общества, прекращением развития производительных сил. В модели имеется вариант реализации регресса, когда энергетические затраты на единицу общественного продукта быстро растут (в (6.11) $d\epsilon_0/dt \geq 0$, и поэтому $d\Delta F'/dt < 0$). Возможно, упадок и гибель этих цивилизаций были обусловлены регрессом общества вследствие того, что рост энергетики (например, за счет использования труда все большего числа рабов) не сопровождался необходимым увеличением работы сопряженного процесса производства общественного продукта.

Современная ноосфера. Эволюция классового общества протекала вначале на основе развития земледелия. Затем, по мере использования новых энергетических источников эволюция ноосферы ускорила (быстрый рост величины ϵ сопровождался и быстрым ростом работы сопряженного процесса — уравнение (6.11)). Из уравнения (6.11) видно, что условие прогрессивной эволюции (6.2) выполняется лишь при определенном соотношении производных по времени от величин ϵ , q_0 , q_{\max} , ϵ_0 , характеризующих энергетические (de/dt), внешние (dq_0/dt) и внутренние (dq_{\max}/dt , $d\epsilon_0/dt$) факторы эволюции.

Из уравнения (6.11) можно заключить, что эволюция ноосферы во все большей степени приобретает характер самодвижения. Действительно, функционирование ноосферы неизбежно приводит к постепенному уменьшению природных ресурсов ($dq_0/dt < 0$). Чтобы при этом прогресс ноосферы имел место (в (6.11) $d\Delta F'/dt > 0$), необходим соответствующий рост используемой энергии ($de/dt > 0$) и (в общем случае) уменьшение

приведенных энергетических затрат на единицу продукта ($d\epsilon_0/dt < 0$), компенсирующие влияние уменьшения природных ресурсов. Следовательно, уменьшение природных ресурсов неизбежно приводит к росту используемой энергии на экстенсивном этапе развития, а также к уменьшению приведенных удельных энергетических затрат — на интенсивном (см. ниже).

Современный этап является переходным от экстенсивного к интенсивному развитию. Об этом свидетельствует все усиливающееся влияние ограниченности природных ресурсов и загрязнения окружающей среды, возникновение глобальных проблем, а также быстрый рост энергозатрат на общественное производство.

На переходном этапе прогресс ноосферы уже не может реализоваться при уменьшении КПД сопряженного процесса, ибо рост энергетики уже не компенсирует его уменьшение. Действительно, запишем на основе уравнения (6.4) выражение для КПД сопряженного процесса ноосферы:

$$\eta = \frac{aq_0}{\epsilon_0} \ln \frac{q_{\max}}{q_0}, \quad a = RT. \quad (6.12)$$

Дифференцируя (6.12) по t и учитывая, что современная ноосфера характеризуется существенной неравновесностью относительно окружающей среды ($q_{\max} \gg q_0$, $\ln q_{\max}/q_0 \gg 1$), получим

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{aq_0}{\epsilon_0 q_{\max}} \frac{dq_{\max}}{dt} + \frac{a}{\epsilon_0} \ln \frac{q_{\max}}{q_0} \frac{dq_0}{dt} - \frac{aq_0}{\epsilon_0^2} \ln \frac{q_{\max}}{q_0} \frac{d\epsilon_0}{dt}. \quad (6.13)$$

Из сопоставления (6.11) и (6.13) видно, что $\frac{d\Delta\bar{F}'}{dt} = \frac{\alpha q_0}{\epsilon_0} \ln \frac{q_{\max}}{q_0} \times \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{\alpha \epsilon}{a} \frac{d\eta}{dt}$. С увеличением ϵ второе слагаемое в этом выражении растёт.

Следовательно, при определенном значении ϵ второе слагаемое становится по абсолютной величине равным первому (для случая $d\eta/dt < 0$). Тогда при дальнейшем увеличении ϵ наступит регресс ($d\Delta\bar{F}'/dt < 0$).

Современный этап, по нашему мнению, и соответствует этой предельной величине используемой энергии. В дальнейшем необходим переход на интенсивное развитие. При анализе были исключены социальные факторы эволюции. Введение социального критерия эволюции представляет существенные трудности. Он не сводится к термодинамическому, хотя между ними, несомненно, существует определенная связь. Так, увеличение КПД общественного производства в капиталистических странах не будет синонимом социального прогресса в случае, если оно приведет к росту безработицы.

О роли кинетических факторов в эволюции ноосферы. Чтобы проанализировать этот вопрос, необходимо обсудить возможную связь между структурой ноосферы, характеризующейся формально величиной q_{\max} , и количеством используемой энергии ϵ . Для сопряженных геохимических процессов зависимость величины q_{\max} от параметров основного процесса ясна. В случае минералообразования на подвижном температурном барьере q_{\max} увеличивается с ростом температуры в источнике (в соответствии с уравнением растворимости) [11], на щелочном — увеличивается с ростом

концентрации кислоты (в соответствии с уравнением закона действующих масс) [11] и т.д. От температуры же раствора (в случае температурного барьера) и концентрации кислоты (в случае щелочного) зависит количество поступающей в эволюционирующие системы энергии (тепловой, химической), на основе которой функционируют системы.

Следовательно, можно принять, что величина q_{\max} функционально зависит от энергии основного процесса, причем с ростом ϵ величина q_{\max} также растет, т.е.

$$q_{\max} = f(\epsilon), \quad dq_{\max}/d\epsilon > 0. \quad (6.14)$$

Этот вывод распространим и на случай ноосферы. Уравнение (6.14) характеризует в рамках термодинамической модели равновесные состояния ноосферы при медленно изменяющихся внешних условиях (когда в системе сохраняется равновесие — это так называемые квазиравновесные состояния). При наличии внутреннего равновесия ноосфера, естественно, не равновесна по отношению к окружающей среде.

Таким образом, при увеличении ϵ растет и величина q_{\max} — структура ноосферы усложняется. Однако скорость изменения этой структуры, величины q_{\max} , конечна (как и вообще любых структур). При быстром росте ϵ изменение структуры ноосферы может не поспевать за изменением ϵ , и функциональная зависимость (6.14) перестает выполняться из-за кинетических факторов (конечной скорости установления равновесия в системе).

Проанализируем роль кинетических факторов в эволюции ноосферы, основываясь на приближенной концепции "запаздывания равновесия". Положим, что равновесная структура ноосферы устанавливается с запаздыванием на время Δt . Тогда вместо (6.12) можно записать

$$\eta = \frac{aq_0}{\epsilon_0} \ln \frac{q_{\max}(t - \Delta t)}{q_0}, \quad \epsilon_0 = \frac{\epsilon}{\alpha}, \quad (6.15)$$

где ϵ_0, q_0 берутся при времени t . Полагая Δt малым ($\Delta t \ll t$), разлагаем $q_{\max}(t - \Delta t)$ в ряд по степеням Δt . Ограничиваясь двумя первыми членами

ряда и допуская, что $\frac{\Delta t}{q_{\max}} \frac{dq_{\max}}{dt} \ll 1$, найдем

$$\eta = \eta_p - \frac{aq_0 \Delta t}{q_{\max} \epsilon_0} \frac{dq_{\max}}{dt}, \quad (6.16)$$

где η_p — "равновесный" КПД (при отсутствии запаздывания равновесия), величина q_{\max} берется при времени t .

Из уравнения (6.16) видно, что кинетические факторы приводят к замедлению эволюции: уменьшение КПД ($\Delta \eta = \eta_p - \eta$) пропорционально времени запаздывания равновесия Δt . Замедление эволюции за счет кинетических факторов особенно существенно в периоды быстрого роста энергетики ($d\epsilon/dt \gg 0$), когда величина q_{\max} возрастает. Фактически это приводит к несоответствию между уровнем энергетики и структурой ноосферы. Наиболее ярким проявлением последнего применительно к современности является противоречие между ракетно-ядерным оружием и состоянием разединенной, неразвитой ноосферы. При бесконечно большой скорости роста энергии имеем в (6.13) $d\epsilon_0/dt \rightarrow \infty$, $d\eta/dt \rightarrow -\infty$, и

поэтому $\eta = 0$. Это может быть интерпретировано как "мгновенный" распад структур ноосферы, гибель цивилизации в результате ядерной войны (при которой $d\epsilon/dt \rightarrow \infty$).

Таким образом, угроза ядерной войны — одно из следствий быстрого, недостаточно контролируемого роста энергетики.

О "гомогенетическом" законе развития. Общность способа функционирования эволюционирующих систем — сопряжение процессов — обуславливает существование единой закономерности развития в неживой и живой природе: онтогенез (развитие индивида) есть краткое повторение филогенеза (истории индивида). Такую закономерность применительно к человеку можно назвать гомогенетическим законом (по аналогии с био- и геогенетическими [8, 43] законами). Можно привести ряд аналогий между процессом становления и развития человечества и индивида. Так, последовательность развития ребенка (ползание—прямохождение—речь—рисование—письменность) повторяет аналогичную последовательность развития первобытного человека. Отношение человека к окружающей среде в процессе становления (собирательство—орудийная деятельность) также аналогично отношению индивида: от детских игр до овладения профессией.

На основе гомогенетического закона развития можно, по-видимому, понять некоторые особенности становления и развития ноосферы. Например, человек как индивид растет, одновременно в процессе обучения увеличиваются его знания об окружающем мире. Однако активная деятельность индивида, воздействующая на окружающий мир, начинается в основном, когда его рост прекратился.

Вероятно, аналогично (и на это уже указывалось) происходило становление гоминид: сначала на основе роста их численности (эволюция роста) при слабом прогрессе, затем путем совершенствования орудийной деятельности (эволюция прогресса). Современные тенденции роста народонаселения в развивающихся странах и его стабилизации в развитых показывают, что эти страны находятся соответственно в "юношеском" и "зрелом" возрасте. По мере промышленного развития рост населения в развивающихся странах неизбежно замедлится, а общая численность населения Земли стабилизируется — эволюция роста (в отношении народонаселения) в развивающихся странах сменится эволюцией прогресса.

Прекращение роста населения Земли, как показано ниже, будет весьма благоприятно для эволюции ноосферы.

КРИТЕРИЙ ИНТЕНСИВНОГО РАЗВИТИЯ НООСФЕРЫ

Все усиливающееся влияние ограниченности природных ресурсов и загрязнения окружающей среды на развитие свидетельствует о том, что человечество вступает в новый период своей истории — период интенсивного развития.

В связи с этим возникает ряд вопросов. Каков критерий интенсивного развития? Каковы причины, обуславливающие необходимость вступления человечества на путь интенсивного развития? Усугубится ли угроза экологических кризисов, связанных с загрязнением окружающей среды, и угроза ядерной войны при вступлении человечества на путь интенсивного развития? Какова роль природной среды на новом этапе эволюции? Сменит-

ся ли прогресс на регресс при истощении природных ресурсов, как это считают некоторые зарубежные исследователи. Научно обоснованный ответ на эти и другие вопросы развития можно попытаться получить на основе разработанной выше модели эволюции.

Интенсивным естественно считать такое развитие, при котором прогресс ноосферы максимально проявлен — КПД сопряженного процесса получения общественного продукта максимально растет со временем. Как видно из (6.13), для этого необходимо, чтобы приведенные энергетические затраты на единицу общественного продукта уменьшались со временем, т.е. термодинамический критерий интенсивного развития есть [13]

$$d\epsilon_0/dt < 0. \quad (6.17)$$

Следует заметить, что на экстенсивном этапе прогресс ноосферы может быть реализован как при выполнении условия (6.17) (в этом случае прогресс максимально проявлен), так и на основе лишь роста энергетики. В последнем случае неравенство (6.17) необязательно должно выполняться. Наоборот, на интенсивном этапе выполнение неравенства (6.17) — необходимое условие прогресса.

Переход от экстенсивного к интенсивному развитию — закономерность эволюционного процесса, обусловленная существованием ограничений на рост используемой энергии. Если $d\epsilon/dt \rightarrow 0$, то, как видно из (6.11) (с учетом (6.14)), прогресс ноосферы может реализоваться (при уменьшающихся природных ресурсах) лишь при уменьшении приведенных энергетических затрат на единицу продукта (компенсирующем уменьшение третьего слагаемого в (6.11)).

Ограничение на рост энергетики ноосферы связано не столько с ограниченностью энергетических ресурсов, сколько с существованием предела диссипации энергии, обусловленного конечной емкостью "приемника" ноосферы — окружающей среды, "загрязняемой" диссипируемой энергией. Рост энергетики сопровождается соответствующим ростом рассеяния, диссипации энергии. Это ведет к усиливающемуся загрязнению окружающей среды и нагреванию атмосферы, что может обусловить нарушение экологического равновесия и изменение климата и, как следствие, ухудшение качества жизни. Этот вопрос широко дискутируется [19, 20, 25–27, 30, 36, 39].

Кроме того, когда скорость роста используемой энергии велика, то, как уже указывалось, возникает неблагоприятное для развития несоответствие между уровнем энергетики и структурой ноосферы. Выше также отмечалось, что влияние роста энергетики на развитие уменьшается со временем.

Влияние ограниченности природных ресурсов и загрязнения окружающей среды на развитие будет неизбежно усиливаться — отрицательная величина dq_0/dt в (6.11) по абсолютной величине будет со временем все более возрастать. В результате возникнет ситуация, когда прогресс ноосферы уже не может реализоваться лишь на основе роста энергетики (увеличения первого и второго слагаемых в (6.11)), а необходимо существенное увеличение энергетической эффективности функционирования ноосферы — выполнение неравенства (6.17).

Эта ситуация соответствует современности. Дальнейшее развитие ноосферы по экстенсивному пути представляется неприемлемым. Это вполне закономерно и обусловлено всей предшествующей историей функционирования ноосферы. Ограниченность природных ресурсов, их постепенное уменьшение, загрязнение окружающей среды, другими словами, ограниченность источника и приемника той открытой системы, что и есть человечество, обуславливает необходимость интенсивного развития ноосферы и неизбежность перехода на этот путь развития.

Реализация интенсивного развития возможна на основе разумной человеческой деятельности, пронизывающей уже всю сферу жизнеобитания. В прошлом, когда роль ограниченности природных ресурсов и загрязнения окружающей среды в развитии еще не была столь существенной, прогресс мог реализоваться в определенной степени стихийно, с ограниченным влиянием "разумного начала". Для современности этот путь развития уже неприемлем. Поэтому действительное вступление человечества на путь интенсивного развития является одновременно и необходимым условием для вступления в ноосферу (сферу разума в прямом смысле этого слова).

Переход на интенсивное развитие отнюдь не означает прекращения роста энергетики, а лишь определенные контролируемые ограничения на ее рост. Чрезмерно быстрый рост энергетики не есть необходимый признак максимального прогресса. Наоборот, он может привести к прогрессирующему загрязнению окружающей среды и усугублению роли неблагоприятных кинетических факторов на развитие — дальнейшему углублению противоречия между энергетическим потенциалом и структурой ноосферы. Поэтому предлагаемая концепция интенсивного развития отнюдь не означает перехода к стационарному состоянию, при котором рост энергетики замедлится или совсем прекратится. Не существует необходимости перехода к стационарному состоянию, как это декларируется рядом исследователей на Западе [30]. Следует заметить, что стационарное состояние совсем не означает отказа от идеи прогресса (как это считают некоторые зарубежные авторы). Ибо, как показано, прогресс связан не только с ростом энергетики, но и с уменьшением энергетических затрат на единицу общественного продукта.

Реализация интенсивного развития будет означать постепенную ликвидацию противоречия между энергетическим потенциалом и структурой ноосферы, между ракетно-ядерным оружием и состоянием неразвитой, разъединенной ноосферы. Это произойдет потому, что будет устранена одна из главных причин возникновения данного противоречия — быстрый рост энергетики, опережающий скорость изменения структуры ноосферы.

Естественно, это не произойдет само собой. Но, как писал выдающийся естествоиспытатель В.И. Вернадский [7, с. 358], "важен для нас факт, что идеалы нашей демократии идут в унисон со стихийным геологическим процессом, с законами природы, отвечают ноосфере". Необходимое условие для вступления в ноосферу — реализация интенсивного развития общества, прекращение гонки вооружений, уничтожение ядерного оружия.

О БУДУЩЕМ НООСФЕРЫ

Большинство процессов, осуществляемых человеком, относится к сопряженным, обуславливающим прогрессивную эволюцию ноосферы. Они осуществляются по пути дальнейшего совершенствования ноосферы, все большего удаления ее от равновесия с окружающей средой. Реализация сопряженных процессов возможна лишь благодаря основным — получения энергии за счет природных источников. Следовательно, энергетика — первая центральная проблема эволюции ноосферы.

Увеличение КПД сопряженных процессов ноосферы есть, с одной стороны, рост их эффективности. По существу это рост производительности труда — вторая центральная проблема эволюции ноосферы. С другой стороны, увеличение КПД — это усложнение ноосферы, осуществление человеком все более сложных процессов. А это невозможно без развития науки; наука — третья центральная проблема эволюции ноосферы.

Эволюционные скачки в биосфере, по-видимому, происходили путем зарождения новых биосистем на фоне массового отмирания старых. Социальные преобразования в прошлом также зачастую были приурочены к большим войнам, сопровождалась массовой гибелью людей. Преодоление этой тенденции эволюции, наступление развитой ноосферы — четвертая центральная проблема эволюции ноосферы.

Количественный анализ перспектив эволюции ноосферы на основе уравнения (6.13) пока затруднен, так как неизвестны численные значения коэффициентов перед производными dq_{\max}/dt , dq_0/dt и $d\epsilon_0/dt$, а также не исследована зависимость этих производных от времени. Однако в принципе такой анализ вполне возможен.

Действительно, по аналогии с некоторыми сопряженными процессами неживой природы положим [4]

$$q_{\max} = b e^{\nu t}, \quad b, \nu = \text{const}, \quad \nu > 0. \quad (6.18)$$

Рассмотрим предельный случай, когда истощением природных ресурсов можно пренебречь. Полагая природные ресурсы постоянными, естественно считать величину q_0 пропорциональной доле природных ресурсов, приходящихся на одного человека, т.е.

$$q_0 = k/N, \quad k = \text{const}, \quad (6.19)$$

где N — численность населения Земли.

Пусть величины ϵ и N экспоненциально растут со временем:

$$\epsilon = E_0 e^{\beta t}, \quad N = N_0 e^{\gamma t}, \quad (6.20)$$

где E_0 , N_0 , β и γ — некоторые постоянные величины. С учетом (6.18)–(6.20) выражение (6.13) примет вид

$$\frac{d\eta}{dt} = \left\{ \frac{\alpha \beta \nu b}{N_0} - \frac{\alpha b}{\epsilon_0 N_0} \left[\ln \frac{a E_0^\nu N_0}{b} + (\gamma + \nu \beta) t \right] \left(\gamma + \frac{1}{\epsilon_0} \frac{d\epsilon_0}{dt} \right) \right\} e^{-\gamma t}. \quad (6.21)$$

Из (6.21) следует, что при экстенсивном развитии ($d\epsilon/dt > 0$, $d\epsilon_0/dt = 0$) прогрессивная эволюция сопряженного процесса ноосферы сначала замедляется, а затем сменяется на регрессивную. Этого не произойдет при интен-

сивном развитии (условие (6.17)), если выполняется

$$\frac{1}{\epsilon_0} \left| \frac{d\epsilon_0}{dt} \right| > \gamma. \quad (6.22)$$

Однако и при интенсивном развитии прогресс ноосферы со временем замедляется: при $t \rightarrow \infty$ $d\eta/dt = 0$, $\eta = \eta_{\max}$.

Изменится ли этот вывод, если в модели учесть существование пределов роста энергетики и народонаселения, а также уменьшение со временем природных ресурсов и загрязнение окружающей среды? Предел роста энергетики означает, что первое слагаемое в (6.21) стремится к нулю. Наоборот, уменьшение скорости роста народонаселения окажет благоприятное влияние на развитие, так как при этом отрицательная величина dq_0/dt по абсолютной величине уменьшится. В конечном счете все будет определяться соотношением производных dq_0/dt и $d\epsilon_0/dt$. Одно несомненно — прогресс в будущем может реализоваться лишь на основе интенсивного развития, уменьшения приведенных энергетических затрат на единицу общественного продукта (поскольку с ростом t в (6.21) $dq_{\max}/dt \rightarrow 0$, а $dq_0/dt < 0$).

Наиболее вероятно все-таки замедление эволюции, существование верхнего предела величины η . Это, однако, не будет означать прекращение развития. Ибо термодинамическая модель эволюции фактически рассматривает лишь товарное производство. Замедление его эволюции будет "скомпенсировано" ускорением социальной и духовной эволюции.

Реальное будущее ноосферы зависит от того, удастся ли человечеству остановить гонку вооружений, избежать ядерной войны [20]. На основе развитой модели эволюции можно высказать ряд соображений по этому вопросу.

Так как ноосфера неравновесна относительно окружающей среды, то существуют многочисленные охранные механизмы этого неравновесия. Благодаря им устойчиво поддерживается неравновесная упорядоченная структура ноосферы. На начальном этапе ноосфера еще разобщена и состоит из существенно разделенных подсистем — отдельных наций, государств. К числу охранных механизмов подсистем относится и армия, назначение которой — сохранять в критические ситуации целостность государств, самобытность наций.

Однако армия могла и неоднократно использовалась для захватнических войн. Причины войн сложны, затушеваны многими историческими обстоятельствами. Но нельзя не учитывать природный фактор — ограниченность природных ресурсов отдельных стран. Чтобы в развитии отдельных государств не наступила стадия регрессивной эволюции при уменьшающейся со временем концентрации рассеянного вещества, эти государства вели захватнические войны, увеличивая тем самым доступные для себя природные ресурсы. В условиях разъединенной, неразвитой ноосферы войны неизбежны.

Современный этап можно считать переходным к состоянию развитой ноосферы. Чем он характеризуется? В первую очередь резким ускорением эволюции ноосферы. Однако при этом охранные механизмы ноосферы не успевают измениться настолько быстро, чтобы соответствовать новым все более сложным состояниям ноосферы. В результате возникает разрыв между состоянием ноосферы и структурой ее охранных механизмов.

Ноосфера в ядерно-ракетный век все более должна рассматриваться как единая система, содружество наций. В силу этого функции армии должны становиться все более ограниченными. Чтобы не скатиться на путь хаоса и самоуничтожения, разрыв между высоким уровнем эволюции ноосферы и более низким уровнем ее охранных механизмов должен постепенно ликвидироваться.

Каковы же необходимые предохранительные меры, чтобы случайно не прерывалась надолго линия прогрессивной эволюции ноосферы, ее путь к развитой ноосфере? Во-первых, это осознание человечеством самого факта разрыва между состоянием ноосферы и структурой ее охранных механизмов. Армия в традиционной форме, гонка вооружений — это анахронизм в современный ракетно-ядерный век. Человечество должно покончить с гонкой вооружений. Во-вторых, пока сохраняется состояние разъединенной, неразвитой ноосферы, необходимо ускоренное развитие производства, науки, торговли, с тем чтобы ограниченность природных ресурсов отдельных стран не стала стимулом к войне. Наконец, необходимо экологическое воспитание людей: коренное изменение взаимоотношений человек—природа; полное осознание своих неразрывных связей с природой; понимание того, что ноосфера существует как сопряженная система на фоне основной, природы в самом широком смысле этого слова; воспитание разумных, а не искусственно раздуваемых потребностей людей. Ибо чрезмерно оптимистично надеяться на полное удовлетворение потребностей людей, которые могут быть несоизмеримо велики по сравнению с ограниченными природными ресурсами Земли. Осознание этого окажет не меньшее воздействие на развитие ноосферы, чем все усиливающееся понимание необходимости мер для охраны окружающей среды.

Реализация интенсивного развития будет означать более гармоничное развитие общественного производства, связанное с энергосберегающими технологиями, с относительным уменьшением диссипации энергии и негативных воздействий на природу. Будут решены глобальные проблемы, осуществится разоружение и будут претворяться в жизнь мировые программы охраны природы, улучшения окружающей среды и жизни человечества.

Что же означает на практике переход от экстенсивного к интенсивному развитию? Этот вопрос не праздный, он стоит на повестке дня, ибо соответствует современному этапу развития. Ответ на этот вопрос может быть дан на основе анализа общих закономерностей эволюции при переходе от экстенсивного к интенсивному развитию. Такой анализ, осуществленный выше, показывает, что этот переход означает переход на такое развитие, при котором уменьшаются приведенные энергетические затраты на единицу продукта (условие (6.17)).

В развитых капиталистических странах тенденция перехода на интенсивное развитие уже пробилась себе дорогу. Так, за 1979—1982 гг. энергетические затраты на единицу валового национального продукта уменьшились там на 15%. Что касается дальнейшего развития, то, по данным ООН, эта тенденция сохранится: если в 1978 г. удельный расход энергии (в килограммах условного топлива на 1 долл. продукта) равнялся 0,68, то к 2000 г. он уменьшится до 0,53 [39].

Естественно, критерий (6.17) интенсивного развития ноосферы характеризует лишь энергетику товарного производства и не совпадает с социаль-

ным критерием эволюции. Если выполнение критерия (6.17) в капиталистических странах будет сопровождаться ростом безработицы, то такое развитие нельзя считать прогрессивным с точки зрения социального критерия эволюции.

Что касается нашего социалистического общества, то в его развитии на первом плане должен стоять человек, наиболее полное удовлетворение его духовных и материальных потребностей¹. На определенном этапе его развития социальная эволюция реализовывалась экстенсивным путем, без выполнения критерия (6.17). Однако дальнейшее развитие по такому пути уже бесперспективно.

Обобщая полученные результаты, можно рассмотреть несколько этапов развития ноосферы. Первый этап — начальная ноосфера, когда человек использует в основном энергию современной ему биосферы. Его длительность — от становления гоминид до искусственного производства энергии (промышленной революции XVIII—XIX вв.). На первом этапе количество используемой энергии еще невелико, ее диссипация мала и поэтому малоблагоприятное воздействие человека на природу. Первый этап характеризуется единством человека с природой.

Второй этап — разведенная развитая ноосфера, когда человек использует энергию как современной, так и былых биосфер (при сжигании угля, нефти и т.п.). Ноосфера разобщена на противоборствующие блоки, имеют место войны, гонка вооружений. Диссипация энергии возрастает, человек оказывает в основном негативное влияние на природу. Этот этап характеризуется разъединением человека и природы.

Третий этап — объединенная развитая ноосфера, в которой функционирует мировое содружество объединенных наций. Осуществлено разоружение, претворяются в жизнь глобальные программы охраны природы, улучшения окружающей среды и условий жизни человечества. Постепенное истощение сырьевых и энергетических ресурсов обуславливает более гармоничное развитие общественного производства, связанное с энергосберегающими процессами, с относительным уменьшением диссипации энергии и негативных воздействий на природу. Человечество во все большей степени будет использовать солнечную энергию непосредственно, минуя биосферу. Этот этап будет характеризоваться постепенным объединением человека и природы.

Настоящее время соответствует переходу от второго этапа эволюции к третьему. Ближайшее будущее ноосферы видится как содружество объединенных наций, в котором на смену гонки вооружений и отчуждению наций придут глобальные программы охраны природы, улучшения окружающей среды и жизни человечества.

¹ Заметим, что всемерное удовлетворение лишь материальных потребностей ведет к обществу потребления и находится в противоречии с ограниченностью природных ресурсов.

О ТРЕХ ТИПАХ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Прогрессивная геохимическая и биологическая эволюция реализуется при изменениях условий развития как основных, так и сопряженных процессов. В зависимости от характера изменения со временем энергетики основного процесса можно выделить три разных типа эволюционирующих систем.

Перепишем выражение (5.34) в виде

$$\eta = A/\epsilon = 1 - \Delta\epsilon/\epsilon, \quad (6.23)$$

где $\Delta\epsilon$ ($\Delta\epsilon = \epsilon - A$, $\Delta\epsilon > 0$) — диссипация энергии (за время t) при функционировании эволюционирующей системы. При дифференцировании (6.23) по t получим

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^2} \frac{d\epsilon}{dt} - \frac{1}{\epsilon} \frac{d\Delta\epsilon}{dt}. \quad (6.24)$$

Отсюда видно, что условие (5.35) прогрессивной эволюции выполняется в трех случаях:

при уменьшении количества подводимой к системе энергии, если

$$\frac{1}{\Delta\epsilon} \left| \frac{d\Delta\epsilon}{dt} \right| > \frac{1}{\epsilon} \left| \frac{d\epsilon}{dt} \right|, \quad \frac{d\epsilon}{dt} < 0, \quad (6.25)$$

при постоянном количестве подводимой энергии, если

$$d\Delta\epsilon/dt < 0, \quad d\epsilon/dt = 0, \quad (6.26)$$

При увеличении количества подводимой энергии, если

$$\frac{1}{\Delta\epsilon} \frac{d\Delta\epsilon}{dt} > \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt}, \quad \frac{d\epsilon}{dt} > 0. \quad (6.27)$$

Условие (6.25) налагает весьма жесткие ограничения на реализацию процесса: приведенная диссипация энергии $\left(\frac{1}{\Delta\epsilon} \left| \frac{d\Delta\epsilon}{dt} \right| \right)$ должна уменьшаться со временем, причем быстрее, чем уменьшается приведенное количество подводимой энергии $\left(\frac{1}{\epsilon} \left| \frac{d\epsilon}{dt} \right| \right)$. Выполняется ли условие (6.25) в природных процессах? По-видимому, прогрессивное развитие реализуется в основном на фоне неумещающихся потоков энергии в системе — при выполнении условий (6.26), (6.27).

Поэтому процессы прогрессивного развития литосферы приурочены к эпохам тектономагматической активизации, в которые происходит увеличение потока эндогенной энергии. В свете изложенного глубокий смысл приобретает представление о прогрессивной и регрессивной стадиях рудообразования, реализующихся на фоне соответственно увеличивающихся и уменьшающихся потоков тепла в рудообразующую систему.

Прогрессивная эволюция биосферы происходила главным образом на основе солнечной энергии, потоки которой существенно не менялись во времени. Поэтому прогресс биосферы сопровождался уменьшением со временем диссипации энергии — условие (6.26). По-видимому, это

обусловлено тем, что способ реализации биологической эволюции естественный отбор — весьма "экономный".

Прогресс ноосферы неизбежно сопровождается увеличением со временем диссипации энергии. Действительно, из (6.27) имеем

$$\epsilon < \left(\Delta\epsilon \frac{d\epsilon}{dt} \right) / \left(\frac{d\Delta\epsilon}{dt} \right), \quad (6.28)$$

и поскольку $\epsilon > 0$, $\Delta\epsilon > 0$, $d\epsilon/dt > 0$, то и $d\Delta\epsilon/dt > 0$.

Условие (6.28) налагает ограничение на рост используемой в ноосфере энергии. Диссипация энергии приводит к загрязнению окружающей среды и нагреванию атмосферы, что может обусловить нарушение экологического равновесия и изменение климата. Следствием этого будет ухудшение качества жизни.

Пусть $\Delta\epsilon_{\max}$ — максимально допустимая диссипация энергии, при которой на Земле еще не начались необратимые процессы, связанные с потерей устойчивости биосферы или нарушением теплового равновесия Земли. Условие (6.28) показывает, что прогресс ноосферы при непрерывном росте энергии возможен лишь при достижении ϵ предельной величины:

$$\epsilon_{\max} = \Delta\epsilon_{\max} \left[\left(\frac{d\epsilon}{dt} \right)_{\epsilon_{\max}} / \left(\frac{d\Delta\epsilon}{dt} \right)_{\Delta\epsilon_{\max}} \right]. \quad (6.29)$$

Дальнейший рост энергии приведет к необратимым процессам на Земле, неблагоприятным для жизни. Проиллюстрируем это простым примером.

Пусть количество реализуемой в ноосфере энергии и ее диссипация растут со временем по экспоненциальному закону:

$$\epsilon = E_0 e^{\alpha t}, \quad \Delta\epsilon = b e^{\beta t}, \quad (6.30)$$

где E_0 , α , b , β — постоянные величины.

Подставляя (6.30), в (6.29) (при $\epsilon_{\max} = E_0 e^{\alpha t_0}$), легко найти время "жизни" технической цивилизации (для которой $d\epsilon/dt > 0$):

$$t_0 = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\alpha \Delta\epsilon_{\max}}{\beta b}. \quad (6.31)$$

Как следует из (6.31), развитие ноосферы должно носить такой характер, при котором минимальны величины β и β/α . При этом время "жизни" технической цивилизации увеличивается.

Изложенное дополнительно проясняет смысл предложенного нами критерия эволюции, а также его соотношение с другими критериями эволюции, которые могут быть предложены или уже имеются в литературе.

Действительно, примем в качестве возможного критерия прогрессивной эволюции рост во времени работы сопряженного процесса

$$dA/dt > 0. \quad (6.32)$$

Условие (6.32) выполняется, если

$$d\Delta\epsilon/dt < d\epsilon/dt. \quad (6.33)$$

Если же в качестве такого критерия принять рост со временем удельной

работы сопряженного процесса (отнесенной к единице объема системы V):

$$d\bar{A}/dt > 0, \quad \bar{A} = A/V, \quad (6.34)$$

то получим следующее условие выполнимости (6.34):

$$\frac{d\Delta\epsilon}{dt} < \frac{d\epsilon}{dt} - \frac{\epsilon}{V} \frac{dV}{dt}. \quad (6.35)$$

Из сопоставления выражений (6.26), (6.27), (6.33), (6.35) следует, что качественно все три условия (5.35), (6.32), (6.34) прогрессивной эволюции одинаковы — они предполагают меньшую скорость роста диссипации энергии ($d\Delta\epsilon/dt$) по сравнению со скоростью роста подводимой к эволюционирующим системам энергии ($d\epsilon/dt$). При $\epsilon = \text{const}$, $V = \text{const}$ все три условия совпадают, вырождаясь в условие (6.26). Что касается количественной стороны, то условие (5.35) более "жесткое", чем (6.32), в то же время условие (6.34) более "жесткое" (при $dV/dt > 0$), чем (6.32). Количественно же сопоставить условия (5.35), (6.34) трудно.

Какое же из возможных условий ((5.35), (6.32), (6.34)) прогрессивного развития более предпочтительно? Ответ на этот вопрос могут дать только фактические данные по эволюции. Они же свидетельствуют о том, что, с одной стороны, прогрессивная эволюция сопровождается ростом КПД сопряженного процесса ($d\eta/dt > 0$), а с другой — увеличением используемой энергии ($d\epsilon/dt > 0$).

Действительно, определенный нами КПД эпигенетического рудообразования имеет порядок сотых долей процента, что существенно меньше КПД сопряженных процессов живой природы. По мере эволюции живой природы термодинамический КПД также растет [32]: у хемосинтезирующих бактерий он имеет порядок первых процентов, КПД фотосинтеза порядка 30%, а биологического окисления у животных — 50–60%.

Как уже указывалось, условие (6.27) есть условие прогрессивной эволюции ноосферы на этапе интенсивного развития. Оно позволяет ввести в анализ предельно возможную величину диссипации энергии $\Delta\epsilon_{\text{max}}$, так что действительная величина диссипации $\Delta\epsilon \leq \Delta\epsilon_{\text{max}}$. Тем самым условие (6.27) учитывает конечную емкость окружающей среды (приемника) в отношении диссипации энергии (и сопутствующего ей загрязнения среды). В то же время условие (6.2) означает, что прогресс имеет место независимо от величины используемой энергии, лишь бы выполнялось неравенство (6.33).

Именно по этой причине условие прогрессивной эволюции ноосферы на интенсивном этапе развития трактуется нами как рост КПД сопряженного процесса. По существу это есть термодинамический критерий коэволюции природы и общества.

СВОЙСТВА ЭВОЛЮЦИИ

Мы показали, что как в неживой, так и в живой природе существуют открытые эволюционирующие системы, функционирующие путем непрерывного обмена веществом и энергией с окружающей средой. В них происходит превращение химической и тепловой энергии в "полезную" работу

сопряженных процессов. По существу эти системы являются природными "устройствами", "машинами", превращающими химическую и тепловую энергию в работу сопряженных процессов.

Необходимым условием существования эволюционирующих систем является наличие направленных потоков энергии и вещества, с которыми сопряжены системы. Эти потоки создаются сами собой (самопроизвольно) в неравновесных закрытых системах при их стремлении к равновесию. Следовательно, неравновесность общей закрытой мегасистемы (Земля—Солнце) является необходимым условием для формирования открытых эволюционирующих систем, функционирующих внутри мегасистемы.

Вначале на Земле возникли и функционировали неживые эволюционирующие системы в потоках термальных растворов, использующие вещество и энергию эндогенных источников за счет их принудительных потоков. По-видимому, аналогичным способом функционировали предбиологические системы. Переход к биологическим системам — это эволюционный скачок, создание таких природных устройств, для функционирования которых требуются лишь внешние (вынужденные) потоки энергии, тогда как необходимый подвод (и отвод) вещества осуществляется самими устройствами. Первоначально живые системы — хемосинтезирующие бактерии — использовали эндогенные источники энергии; затем образовались растения, использующие энергию Солнца. Следующий эволюционный скачок означал переход к животным, для функционирования которых уже непосредственно не требуется принудительных потоков вещества и энергии. Животные сами осуществляют подвод лишь вещества (пищи), которое является "горючим" для получения необходимой энергии. Наконец, переход к человеку означал конструирование природой таких устройств, которые сами осуществляют необходимый подвод как вещества (пищи), так и энергии (используя энергетические ресурсы Земли)¹.

Именно в способе реализации подвода вещества и энергии к открытым системам заключается, по мнению автора, отличие живого от неживого, а в живом — специфичность каждой из систем растения—животные—человек.

Таким образом, эволюция идет по пути усложнения связей открытых систем с потоками энергии (и вещества) Земли и Солнца. Если на начальном этапе такая связь была прямой, непосредственной — для существования систем требовался принудительный поток энергии и вещества, то затем она становится опосредованной. Так, животные используют энергию Солнца не непосредственно, а через растительную пищу.

В процессе эволюции открытые системы все более удаляются от равновесия с окружающей средой. Отсюда резко усложняются охранительные механизмы этого неравновесия, что приводит к усложнению строения систем. Удаленность систем от равновесия со средой, опосредствованный характер их связей с ней создают на первый взгляд впечатление все большей независимости их от окружающей среды. Однако это не так. Чем более

¹ Отсюда видно, какое большое значение имеет для животного и человека движение, двигательная активность. В частности, переход на стойловое безвыгонное содержание коров неизбежно ведет к "регрессу", что и подтверждается практикой животноводства.

сложны системы, тем они более уязвимы изменениями внешних условий. Об этом свидетельствует, в частности, ускорение биологической эволюции со временем. Чем более сложный биологический объект, тем быстрее он эволюционирует, превращаясь в другой или погибая.

Характерные свойства эволюции — "потеря" массы эволюционирующих систем, когда более высокой ступени эволюции достигают все более частные подсистемы (с меньшей массой); иерархия и соподчиненность систем эволюции. Так, в ряду литосфера—биосфера—ноосфера возрастает уровень эволюции и одновременно уменьшается масса эволюционирующих систем. Каждая частная подсистема (с более высоким уровнем эволюции) развивается на фоне общей, которая служит окружающей средой, источником энергии и формирующих подсистему компонентов. Так, растительный мир биосферы возник на фоне литосферы, где находится первичный источник CO_2 , животный мир сопряжен с растительным и т.п. Изменения в общей системе вызывают соответствующие изменения сопряженных процессов функционирования всех более частных соподчиненных подсистем, их эволюцию.

Развиваемый подход конкретизирует постулат о единстве неживой и живой природы. С одной стороны, живая природа есть система, сопряженная с неживой, использующая ее энергетические ресурсы, с другой — нет принципиальной разницы между живыми и сопряженными неживыми системами (в отношении энергетики их функционирования). Отличие между ними лишь в усложнении связей живых систем с потоками энергии (и вещества) Земли и Солнца по сравнению с неживыми.

Рассмотренная концепция эволюции объясняет также фундаментальное свойство живых систем с сопряженными процессами (как геохимических, так и биологических) — конечное время "жизни" отдельных индивидов (кристаллических частиц, живых организмов), из которых построены системы. Оно обусловлено динамическим неравновесием данных систем относительно окружающей среды, при котором неизбежны процессы распада ("смерти" индивидов). Последнее, однако, непрерывно компенсируется синтезом (рождением новых индивидов) благодаря потреблению энергии основной реакции.

Образно говоря, открытые системы с сопряженными процессами формируются, если на пути самопроизвольных потоков энергии и вещества имеются подвижные полупроницаемые перегородки, избирательно уменьшающие скорость рассеяния энергии и вещества. Вследствие этого в определенной области перед перегородкой происходит повышение содержания вещества и энергии — в этой области формируются открытые системы с сопряженными процессами концентрирования вещества. При этом вещество по-прежнему рассеивается, но оно движется через систему медленнее, чем если бы сопряженные процессы концентрирования вещества отсутствовали. Время задержки миграции вещества (разница между временем миграции в объеме системы при наличии и отсутствии подвижной полупроницаемой перегородки) можно отождествить с временем жизни отдельных индивидов, из которых построена открытая система. Оно всегда конечно, поскольку процессы рассеяния вещества и энергии при наличии подвижных полупроницаемых перегородок лишь замедляются, но не прекращаются (что противоречило бы второму началу термодинамики).

Сущность прогрессивного развития — в количественном и качественном увеличении числа сопряженных процессов, в возникновении на основе низших форм движения более высоких, сопряженных с первыми. Развитие реализуется через борьбу противоположностей, как это показывает диалектический материализм. Главные "противоборствующие" противоположности развития — это процессы рассеяния—концентрирования энергии. На фоне рассеяния энергии Солнца частично происходит ее концентрирование растениями. Затем эта сконцентрированная энергия вновь рассеивается путем ее утилизации человеком, частично концентрируясь в общественном продукте. Однако и общественный продукт в конце концов обесценивается, а запасенная в нем энергия рассеивается.

Второе начало термодинамики как принцип рассеяния энергии не отражает движущих сил развития как борьбы противоположностей. Проводимая же здесь трактовка второго начала на основе сопряжения (противоположных) процессов рассматривает развитие как "борьбу" противоположных процессов рассеяния — концентрирования энергии. Как писал В.И. Ленин в статье "К вопросу о диалектике", первая трактовка (второго начала как принципа рассеяния энергии) есть концепция развития "как уменьшение и увеличение", а вторая — "как единство противоположностей". «При первой концепции движения остается в тени *само* движение, его *двигательная* сила, его источник, его мотив... При второй концепции главное внимание устремляется именно на познание *источника "само"* движения.

Первая концепция мертва, бледна, суха. Вторая — жизненна. *Только* вторая дает ключ к "самодвижению" всего сущего; только она дает ключ к "скачкам", к "перерыву постепенности", к "превращению в противоположность", к уничтожению старого и возникновению нового» (Т. 29. С. 317).

Следует различать эволюцию как систем, так и сопряженных процессов, на основе которых функционируют открытые эволюционирующие системы. На экстенсивном этапе развития прогрессивная эволюция систем реализуется на основе роста используемой энергии. Существование предела для этого роста обуславливает закономерность прогрессивной эволюции открытых систем — переход от экстенсивного к интенсивному развитию. При интенсивном развитии критерий прогрессивной эволюции системы и сопряженного процесса совпадают, сводясь к росту со временем КПД сопряженного процесса. Закономерность перехода от экстенсивного к интенсивному развитию соответствует закону диалектики о переходе количества (роста энергии) в качество (уменьшение энергетических затрат на единицу общественного продукта).

Развитая концепция эволюции отвечает представлениям диалектического материализма о развитии, конкретизируя их на основе естественнонаучной концепции эволюции открытых систем с сопряженными процессами. При этом выявляется закономерность прогрессивной эволюции ноосферы — переход от экстенсивного к интенсивному развитию. Современный этап является переходным от периода экстенсивного развития к интенсивному. Этим обусловлено возникновение глобальных проблем. Глобальные проблемы будут решены при вступлении человечества на путь интенсивного развития.

ЧТО СУЩЕСТВЕННОГО ОБ ЭВОЛЮЦИИ СЛЕДУЕТ ИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В начале книги автор обещал читателю дать непротиворечивые ответы на ряд существенных вопросов об эволюции, которые были недостаточно ясны или относительно которых в литературе существуют разные точки зрения. Насколько это удалось, судить читателю.

Перечислим еще раз основные неясные вопросы и дадим на них краткие ответы, следующие из развитой модели эволюции.

Какие системы относятся к прогрессивно эволюционирующим? Прогрессивно эволюционируют открытые системы с сопряженными процессами, неравновесные относительно окружающей среды.

В чем сущность прогрессивной эволюции? Она в увеличении со временем степени неравновесности открытых систем по отношению к окружающей среде, в частности степени концентрирования вещества источника, формирующего систему.

Каков количественный критерий эволюции? Следует различать эволюцию системы и сопряженного процесса. При прогрессивной эволюции сопряженного процесса возрастает его КПД, а при прогрессивной эволюции системы — удельная свободная энергия (удельная максимальная работа) сопряженного процесса.

Каковы движущие силы эволюции? Эволюция происходит за счет использования сопряженными процессами потоков энергии (и вещества) внешних источников, возникающих при стремлении закрытых мегасистем (включающих в себя составной частью эволюционирующие открытые системы) к равновесию. В эволюционирующих системах функционируют природные "устройства", "машины", превращающие химическую и тепловую энергию в работу сопряженных процессов.

Каковы причины эволюции? Прогрессивная эволюция обусловлена изменением со временем внешних источников вещества и энергии, их истощением при стремлении закрытых мегасистем к равновесию.

Какой механизм реализации прогрессивной эволюции в неживой природе? Геологическая (геохимическая) эволюция происходит в открытых системах с сопряженными процессами на подвижных геохимических барьерах при конвективном подводе вещества и энергии к системам.

В чем причина замечательного сходства эволюции в неживой и живой природе? Она обусловлена тем, что способ функционирования эволюционирующих систем в неживой и живой природе одинаков — сопряжение процессов.

В чем специфичность открытых систем живой природы (в отношении массообмена с окружающей средой)? Она в том, что биологические системы функционируют при диффузионном массообмене со средой (путем активного транспорта через биологические мембраны), в то время как сопряженные геохимические — лишь при конвективном массообмене.

Как объяснить кажущееся противоречие между фактами прогрессивной эволюции на Земле и вторым началом термодинамики? Второе начало термодинамики не отрицает возможность протекания несопроизвольных (сопряженных) процессов на фоне самопроизвольных (основных). Последние выступают в роли источника энергии, необходимой для развития сопряженных процессов.

Существует ли связь между внешними и внутренними факторами эволюции? Внутренние свойства эволюционирующих систем (их структура) функционально зависят от внешних (граничных) условий функционирования систем: при изменении последних меняется и состояние систем, они эволюционируют. Изменение внешних условий — это причина эволюции. Путь эволюции, как она конкретно реализуется при изменении внешних условий, определяется внутренними свойствами системы, ее структурой.

В чем специфичность эволюции неживой и живой природы? Геохимическая эволюция происходила на основе как сопряженных, так и основных процессов при постепенном истощении эндогенных источников вещества и энергии. Биологическая эволюция происходила в основном лишь на основе сопряженного процесса (фотосинтеза). Эволюция ноосферы происходит на основе как основных, так и сопряженных процессов при прогрессивном увеличении энергетики ноосферы.

Почему эволюция протекает неравномерно? Геохимическая и биологическая эволюция происходили ускоренно в эпохи тектономагматической активизации.

Каков критерий интенсивного развития ноосферы? Это уменьшение со временем приведенных энергетических затрат на единицу общественно-го (совокупного) продукта.

Каковы причины, обуславливающие необходимость вступления человечества на путь интенсивного развития? Ограниченность природных ресурсов, их постепенное истощение, загрязнение окружающей среды — другими словами, ограниченность источника и приемника той открытой системы, что и есть человечество.

Какова роль природной среды на новом этапе эволюции? Эволюция ноосферы во все большей степени становится самодвижением, когда прогрессирующее истощение природных ресурсов при функционировании ноосферы приводит к необходимости увеличения используемой энергии и уменьшения приведенных энергетических затрат на единицу общественного продукта.

Сменится ли прогресс на регресс при истощении природных ресурсов? Прогресс связан не только с ростом энергетики, но и с уменьшением приведенных энергетических затрат на единицу общественного продукта. В будущем прогресс может быть реализован лишь на основе интенсивного развития.

Усугубится ли угроза экологических кризисов, связанных с загрязнением окружающей среды, и угроза ядерной войны при вступлении человечества на путь интенсивного развития? Реализация интенсивного развития обеспечит более гармоничное развитие производства, связанное с энерго-сберегающими технологиями, с относительным уменьшением диссипации энергии и негативных воздействий на природу, а также постепенную ликвидацию противоречия между энергетическим потенциалом и структурой ноосферы, между феноменом ракетно-ядерного оружия и состоянием разделенного на военные блоки мира.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Об удовлетворительности теоретических моделей природных процессов следует судить по совпадению следствий из них с наблюдаемыми закономерностями, а об их плодотворности — по тому, открывают ли они новые неизвестные ранее закономерности, предлагают ли более обоснованное объяснение известных. Модель не может быть полностью адекватна реальному объекту, "хорошая" на данном этапе развития науки, она в дальнейшем становится недостаточной и заменяется новой.

Развитая модель эволюции объясняет сам факт эволюции с единой точки зрения — как следствие уменьшения эндогенных потоков вещества и энергии, происходившего на общем фоне остывания Земли. Она обосновывает приуроченность эволюции литосферы и биосферы к эпохам тектономагматической активизации и интенсивного вулканизма. Что касается ноосферы, то модель дает возможность строить новые гипотезы и теории эволюции.

Анализ энергетики функционирования открытых систем с сопряженными процессами концентрирования вещества показывает существование универсальной закономерности эволюции. А именно, наличие энергетических источников приводит к зарождению и функционированию сопряженных с ними (утилизирующих энергию) открытых эволюционирующих систем разного типа (геохимических, биологических, общественных). Тем самым соединяются две противоположные эволюционные концепции: термодинамическая — о рассеянии, обесценивании энергии — и биологическая — об усложнении структур и функций организмов. Процессы усложнения открытых систем, образования структур и т.п. сопряжены с рассеянием энергии в закрытых системах, являясь при определенных условиях неизбежным его следствием. С учетом тесной связи, обусловленности эволюции живой природы геологическими (геохимическими) факторами представляется целесообразным говорить о геобиологической эволюции.

Проблема происхождения жизни (биогенеза), эволюции является не только биологической и химической, но еще более геохимической. Она с неизбежностью будет приобретать все большую значимость во многих естественных, в том числе геологических, науках.

Этот удивительный мир эволюции манит своими загадками. И не лучшее ли поприще для человечества — познать этот загадочный мир, познать самого себя и свое место в природе, чем "изобретать" все новые способы самоуничтожения, засоряя ноосферу орудиями войны и регресса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батулин С.Г., Головин Е.А., Зеленова О.И. и др. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. М.: Атомиздат, 1965. 324 с.
2. Будыко М.И. Изменение окружающей среды и смена последовательности фаун. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 76 с.
3. Будыко М.И., Ронов А.Б., Яншин А.Л. История атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 208 с.
4. Булкин Г.А. Введение в статистическую геохимию. Л.: Недра, 1972. 208 с.
5. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы и ее окружения. М.: Наука, 1965. 328 с.
6. Вернадский В.И. Размышления натуралиста // Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1977. Кн. 2. 192 с.
7. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Мысль, 1967. 396 с.
8. Вилли К. Биология. М.: Мир, 1968. 808 с.
9. Галимов Э.А. Природа биологического фракционирования изотопов. М.: Наука, 1981. 246 с.
10. Гладышев Г.П. Термодинамика и макрокинетика природных иерархических процессов // Журн. физ. хим. 1987. Т. 111, № 9. С. 2289–2301.
11. Голубев В.С. Динамика геохимических процессов. М.: Недра, 1971. 208 с.
12. Голубев В.С. Энергия и коэффициент полезного действия эпигенетического рудообразования // ДАН СССР. 1983. Т. 272, № 4. С. 921–923.
13. Голубев В.С. Термодинамическая модель эволюции сопряженных процессов биосферы и ноосферы // Второе Всесоюзное совещание по геохимии углерода. М., 1986. С. 170–172.
14. Голубев В.С., Теняков В.А. Общие закономерности геохимических и биологических процессов, обусловившие возникновение жизни на Земле // ДАН СССР. 1982. Т. 264, № 5. С. 1221–1224.
15. Голубев В.С., Теняков В.А. О коэффициенте полезного действия сопряженных процессов в связи с геохимической и биогеохимической эволюцией // ДАН СССР. 1983. Т. 271, № 2. С. 402–405.
16. Даниэльс Ф., Олберти Р. Физическая химия. М.: Мир, 1978. 646 с.
17. Ершов Ю.А. Термодинамика квазиравновесий в биологических системах. М.: ВИНТИ, 1983. 139 с. (Итоги науки и техники; Т. 5).
18. Кедров Б.М. Предмет и взаимосвязь естественных наук. М.: Наука, 1967. 416 с.
19. Кибернетика и ноосфера. М.: Наука, 1986. 156 с.
20. Кибернетика, ноосфера и проблемы мира. М.: Наука, 1986. 142 с.
21. Климонтович Ю.Ю. Синергетика: десять лет спустя // Энергия: экономика, экология, техника. 1984. № 12. С. 37–42.
22. Кузовлева О.Б. О роли комплементарных структур в биологических реакциях // Журн. общ. биологии. 1976. Т. 37, № 2. С. 255–261.
23. Малиновский Ю.М. Синфазная стратиграфия фанерозоя. М.: Недра, 1982. 176 с.
24. Мархинин К.Е. Предбиологические соединения в пепле вулкана // Природа. 1974. № 8. С. 70–78.
25. Моисеев Н.Н. Человек, природа, общество. М.: Наука, 1982. 240 с.
26. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987. 304 с.
27. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. М.: Наука, 1985. 272 с.

28. Мухин Л.М. О возможности синтеза предшественников сложных органических соединений в районах подводного вулканизма // Космическая биология и медицина, 1971. № 6. С. 80–81.
29. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
30. Одум Г., Одум Э. Энергетический базис человека и природы. М.: Прогресс, 1976. 380 с.
31. Осадочная геология докембрия. М.: Наука, 1982. 248 с.
32. Пасынский А.Г. Биофизическая химия. М.: Высш. шк., 1968. 432 с.
33. Первобытный человек и природная среда. М.: Ин-т географии АН СССР, 1974. 314 с.
34. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1979. 422 с.
35. Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985. 326 с.
36. Проблемы социальной экологии. Львов, 1986. Ч. I. 206 с.; Ч. II. 182 с.; Ч. III. 180 с.
37. Проблемы эволюции геологических процессов. Новосибирск: Наука, 1981. 208 с.
38. Развитие эволюционной теории в СССР. Л.: Наука, 1983. 614 с.
39. Реймерс Н.Ф. Будущее начинается сегодня // Энергия: Экономика, экология, техника, 1984. № 12. С. 33–40.
40. Ронов А.Б. Вулканизм, карбонатакопление, жизнь: (Закономерности глобальной геохимии углерода) // Геохимия. 1976. № 8. С. 1252–1277.
41. Руденко А.П. Теория саморазвития открытых каталитических систем. М.: Изд-во МГУ, 1969. 276 с.
42. Рундквист Д.В. О пространственно-временных закономерностях размещения месторождений полезных ископаемых // Л.: Наука, 1971. С. 266–299. (Тр. ВСЕГЕИ; Т. 177).
43. Рундквист Д.В. Использование закономерностей развития минеральных образований во времени при прогнозно-металлогенических исследованиях // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1982. Ч. 3, № 4. С. 407–421.
44. Руттен М. Происхождение жизни. М.: Мир, 1973. 412 с.
45. Сафронов Н.И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л.: Недра, 1981. 216 с.
46. Сидоренко Св.А., Теняков В.А. О "глобальных" эпохах накопления в докембрии высокоуглеродистых формаций // ДАН СССР. 1978. Т. 242, № 1. С. 172–175.
47. Сидоренко Св.А., Теняков В.А., Голубев В.С. К эволюции живых систем и периодичности накопления биолитогенных образований в докембрии // ДАН СССР. 1984. Т. 276, № 4. С. 943–945.
48. Смирнов В.И. Эндогенное рудообразование в геологической истории // Геология руд. месторождений. 1982. № 4. С. 3–20.
49. Соколов Б.С. Органический мир Земли на пути к фанерозойской дифференциации // Вестн. АН СССР. 1976. № 1. С. 126–143.
50. Хаггис Дж., Михи Д., Мюир А. и др. Введение в молекулярную биологию. М.: Мир, 1967. 434 с.
51. Шредингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика. М.: Изд-во Иностран. лит., 1943. 146 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ФАКТЫ ЭВОЛЮЦИИ НА ЗЕМЛЕ	7
Эволюция в неживой природе	7
Эволюция в живой природе	9
Эволюция ноосферы	11
Что известно и что не известно об эволюции	12
Глава 2. СОПРЯЖЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ НА ПОДВИЖНОМ ГЕОХИМИЧЕСКОМ БАРЬЕРЕ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ	13
Противоречит ли эволюция второму началу термодинамики?	14
Сопряженные процессы минералообразования на подвижном температурном барьере	16
Сопряженные процессы минералообразования на подвижном щелочном барьере	18
Сопряженный процесс рудообразования на подвижном восстановительном барьере	20
Коэффициент полезного действия сопряженных процессов минералообразования на подвижном температурном барьере	24
Коэффициент полезного действия сопряженных процессов минералообразования на подвижном щелочном барьере	25
Эволюция сопряженных процессов минералообразования на подвижном геохимическом барьере	27
Глава 3. МОДЕЛЬ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ	29
Свободная энергия и коэффициент полезного действия эпигенетического рудообразования	29
Об эволюции эпигенетического рудообразования	32
Об эволюции литосферы	34
Об эволюции осадочного процесса	36
Коэффициент полезного действия и эволюция биогенного минералообразования	37
Глава 4. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ	38
Сопряжение процессов в биологических системах	39
Общие закономерности сопряженных геохимических и биологических процессов	41
Об одном из вероятных путей предбиологической эволюции	42
Глава 5. ЭВОЛЮЦИЯ БИОСФЕРЫ	44
Геохимический цикл углерода	44
О возможности реставрации изменения CO ₂ атмосферы и массы биоты в фанерозе	50

Об эволюции фотосинтезирующих организмов	53
Об эволюции животного мира	55
Вулканизм и жизнь	58
Глава 6. ЭВОЛЮЦИЯ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ С СОПРЯЖЕННЫМИ ПРО-	
ЦЕССАМИ	60
Критерий эволюции открытых систем	61
Коэффициент полезного действия сопряженного процесса концент-	
рирования веществ	63
О роли кинетических факторов в эволюции	64
Об эволюции ноосферы	66
О прошлом и настоящем ноосферы	69
Критерий интенсивного развития ноосферы	74
О будущем ноосферы	77
О трех типах эволюционирующих систем	81
Свойства эволюции	83
Что существенного об эволюции следует из термодинамической	
модели	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89
ЛИТЕРАТУРА	90

CONTENTS

	PREFACE	3
	INTRODUCTION	5
Chapter 1.	PROOFS OF EVOLUTION ON THE EARTH	7
	Evolution in inanimate nature	7
	Evolution in animate nature	9
	Evolution of the noosphere	11
	Certainties and uncertainties of evolution	12
Chapter 2.	CONJOINED PROCESSES OF MINERAL FORMATION ON THE MOBILE GEOCHEMICAL BARRIER AND THEIR EVOLUTION . . .	13
	Does evolution agree with the second principle of thermodynamics? . .	14
	Conjoined processes of mineral formation on the mobile temperature barrier	16
	Conjoined processes of mineral formation on the mobile alkaline barrier	18
	Conjoined processes of ore formation on the mobile restoration bar- rier	20
	The efficiency of the conjoined processes of mineral formation on the mobile temperature barrier	24
	The efficiency of the conjoined processes of mineral formation on the mobile alkaline barrier	25
	The Evolution of the conjoined processes of mineral formation on the mobile geochemical barrier	27
Chapter 3.	THE GEOCHEMICAL EVOLUTION MODEL	29
	The free energy and the efficiency of the epigenetic ore formation . .	29
	On the evolution of the epigenetic ore formation	32
	On the evolution of the lithosphere	34
	On the evolution of the sedimentation process	36
	The efficiency and the evolution of the biogenetic mineral formation . .	37
Chapter 4.	THE COMMON REGULARITIES OF THE GEOCHEMICAL AND THE BIOLOGICAL PROCESSES AND THEIR SIGNIFICANCE FOR THE ORIGIN OF LIFE ON THE EARTH	38
	The conjunction of processes in biological systems	39
	The common regularities of the conjoined geochemical and biological processes	41
	On one of the probable way of the prebiological evolution	42
Chapter 5.	THE EVOLUTION OF THE BIOSPHERE	44
	The geochemical cycle of carbon	44
	On the possibility of the determination of the change of CO ₂ of both the atmosphere and the biota mass in the Phanerozoic	50
	On the evolution of photosynthesizing organisms	53

On the evolution of the animal world	55
Volcanism and life	58
Chapter 6. THE EVOLUTION OF OPEN SYSTEMS WITH CONJOINED PROCESSES	60
The criterion of the evolution of the open systems	61
The efficiency of the conjoined processes of concentrating substances	63
On the role of kinetic factors in the evolution	64
On the evolution of the noosphere	66
On the past and the present of the noosphere	69
The criterion of the intensive development of the noosphere	74
On the future of the noosphere	77
On the three types of evolving systems	81
The characteristics of the evolution	83
What does the thermodynamic model give for the cognition of the evolution?	87
CONCLUSION	89
BIBLIOGRAPHY	90

Научное издание

ГОЛУБЕВ Владимир Степанович

МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ГЕОСФЕР

*Утверждено к печати
Институтом литосферы АН СССР*

Художник *А.П. Дегтярев*
Художественный редактор *И.Ю. Нестерова*
Технический редактор *Г.И. Астахова*
Корректор *Т.И. Шеповалова*

Набор выполнен в издательстве
на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 46932

Подписано к печати 12.04.90. Т-05741
Формат 60 X 90 1/16. Бумага офсетная № 1
Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная
Усл.печ.л. 6,0. Усл.кр.-отт. 6,3. Уч.-изд.л. 6,8
Тираж 950 экз. Тип. зак. 155. Цена 1 р. 40 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Наука"
117864 ГСП-7, Москва В-485,
Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

5237

