

---

# 9

## УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ: ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

*Савенко В.С.*

---

В конце 80-х годов прошлого столетия Международная комиссия ООН по окружающей среде и развитию представила доклад «Наше общее будущее», в котором признавалось наличие глубочайшего экологического и социально-экономического кризиса современной цивилизации и со всей определенностью ставился вопрос о необходимости выработки общемировой стратегии долгосрочного развития человечества. Сформулированная в этом докладе директива, названная стратегией устойчивого развития (*sustainable development*), констатировала необходимость перехода человечества к такому развитию, которое удовлетворяло бы потребности ныне живущих людей, и в то же время не ставило бы под угрозу возможность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности. Эта точка зрения получила широкую поддержку в обществе, несмотря на два существенных обстоятельства, имеющих значение при преобладающей в настоящее время позиции отождествления потребностей с потреблением материальных благ. Во-первых, история развития человечества в XX в. наглядно показала, что очень трудно предвидеть и, следовательно, обеспечивать потребности будущих поколений в силу непредсказуемости ни базовых принципов, ни времени появления новых технологий. Во-вторых, вхождение современной цивилизации в состояние глобального экологического кризиса определенно свидетельствует о невозможности дальнейшего приоритета принципа антропоцентризма, согласно которому все рассматривается с точки зрения удовлетворения потребностей человека (конечно, если только само его существование не относить к потребностям).

Принципы стратегии устойчивого развития могут стать более определенными, если исходить из того, что человек и производимая им хозяйственная деятельность являются закономерным итогом и одним из этапов эволюции биосферы [6; 7]. При таком рассмотрении проблема устойчивого развития лишается антропоцентристской направленности. Она становится естественнонаучной проблемой, решение которой связано с выяснением фундаментальных законов функционирования и эволюции биосферы — планетарной экосистемы с челове-

Россия в окружающем мире: 2010. Устойчивое развитие: экология, политика, экономика: Аналитический ежегодник / Отв. ред. *Н.Н. Марфенин*; под общей редакцией *Н.Н. Марфенина, С.А. Степанова*. — М.: Изд-во МНЭПУ, 2010. — 352 с.

ком в качестве одного из равноправных компонентов, а также определением условий, при которых хозяйственная деятельность не влечет за собой потерю биосферой устойчивости и сход с устойчивой, квазистационарной траектории эволюции.

Существенный вклад в разработку стратегии устойчивого развития может внести геохимия, изучающая природные объекты и явления на атомно-молекулярном уровне и выясняющая законы и историю миграции атомов химических элементов в пространстве Земли. Геохимический язык очень прост, поскольку «алфавит» включает всего около 90 «букв» — разных химических элементов (для сравнения, биологический «алфавит» насчитывает не менее десяти миллионов «букв», соответствующих различным видам организмов), а геохимическое описание самых разных объектов и явлений природы имеет достаточно общий характер, тем более что в основе «грамматики» современной геохимии лежат фундаментальные законы физики и химии. В силу этих обстоятельств геохимический взгляд на проблему устойчивого развития обладает значительной универсальностью и позволяет на единой основе подходить к описанию и анализу природных и социально-экономических процессов.

### **ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ УСТОЙЧИВОСТИ БИОСФЕРЫ**

Устойчивость — свойство систем изменяться под действием внешних возмущений или внутренних процессов таким образом, чтобы отклонения от исходного состояния имели минимальные значения. После прекращения действия возмущающих факторов устойчивые системы восстанавливают исходное состояние. Если малое возмущение приводит к изменению состояния системы, которое с течением времени усиливается, то такая система считается неустойчивой. Наоборот, в устойчивой системе изменения, вызванные малыми возмущениями, с течением времени постепенно уменьшаются и, в конце концов, исчезают.

Можно говорить о двух видах устойчивости: устойчивости равновесия и устойчивости движения, понимаемого как изменение вообще. В первом случае устойчивость проявляется в способности систем, находящихся в равновесном состоянии, возвращаться к нему после небольших отклонений, вызванных действием возмущающих факторов. Во втором случае устойчивость обусловлена способностью систем минимизировать отклонения от заданной траектории движения под влиянием незначительных случайных возмущений. Устойчивость равновесия и устойчивость движения по существу связаны с изменением структурно-функциональной организации систем и возникновением внутри них сил, противоположно направленных по отношению к вектору действия возмущающих факторов.

Определение устойчивости природных систем является непростой задачей. При математическом анализе устойчивости достаточно выяснить, насколько удовлетворяет поведение рассматриваемой системы критериям устойчивости Ляпунова, однако применение этих критериев к реальным природным системам затруднено в силу сложности создания более или менее

адекватных математических моделей. Другой подход основан на постулате эволюционного предпочтения устойчивых состояний: состояния с меньшей устойчивостью обладают меньшей продолжительностью жизни и с течением времени исчезают, тогда как устойчивые состояния, обладающие относительно большим временем жизни, сохраняются и постепенно вытесняют первые. Определяющую роль здесь играют логические операции с данными натурных наблюдений, направленные на поиск переходов от эмпирических обобщений к характеристикам устойчивости. Хотя строгость выводов, присущая математическому подходу, при этом теряется, эволюционно-эмпирический метод позволяет оперировать непосредственно наблюдаемыми (измеряемыми) характеристиками природных объектов и включить в рассмотрение фактор времени, что для наук о Земле очень важно. В отношении биосферы априорно допускается устойчивость ее естественного состояния, но единственным аргументом в пользу данного утверждения служит сам факт существования биосферы в течение, по крайней мере, трех миллиардов лет.

Согласно термодинамической теории нелинейных необратимых процессов Николиса-Пригожина, неравновесная система находится в пределах устойчивости при положительном значении суммы произведений вариаций потоков ( $J$ ) и соответствующих термодинамических сил ( $X$ ):

$$\sum \delta J \delta X > 0,$$

причем для некоторых процессов, протекающих в стационарной неравновесной системе, произведения  $\delta J \delta X$  могут быть меньше нуля, если сумма всех произведений  $\delta J \delta X$  остается положительной. По термодинамической классификации биосфера относится к нелинейным неравновесным системам, для которых теория Николиса-Пригожина позволяет достаточно строго подойти к анализу устойчивости. Однако несмотря на то, что в современной геохимии количественное изучение потоков веществ составляет одно из наиболее успешно развивающихся направлений исследований, имеющих знания, особенно в отношении механизмов сопряжения потоков, недостаточно для корректного использования этой теории.

С геохимической точки зрения жизнь есть способ существования биокосных систем, состоящих из живых организмов и непосредственно с ними взаимодействующей абиотической среды. Этот способ — биотический круговорот — в наиболее упрощенном виде сводится к двум взаимно связанным процессам, производимым живыми организмами: синтезу и минерализации органического вещества<sup>1</sup>. В биосфере биотические круговороты отдельных биогеоценозов объединены между собой в форме глобального круговорота веществ, называемого разными авторами биосферным или климатическим круговоротом. Поскольку биосфера представляет собой самую крупную биокосную систему [1], то ее ус-

<sup>1</sup> В действительности биотический круговорот включает не только продукционно-деструкционные, но и многие другие сопряженные с ними биотические и абиотические процессы, образующие в совокупности определенную форму структурно-функциональной организации биокосных систем.

тойчивость в первом приближении может быть соотнесена с устойчивостью процессов синтеза и минерализации органического вещества в планетарном масштабе.

Очевидно, что для поддержания жизни на Земле необходимо равенство количеств синтезируемого и минерализуемого органического вещества, т.к. нарушение сбалансированности продукционно-деструкционных процессов приводит к исчезновению либо биологически доступных форм минеральных компонентов, необходимых для питания автотрофных организмов (продуцентов), либо органических веществ, которые являются пищей для гетеротрофных организмов (консументов и редуцентов). При современной интенсивности продукции органического вещества порядка 100 млрд т С/год потребуется всего лишь около 400 лет, чтобы перевести весь биологически доступный минеральный углерод углекислоты атмосферы и растворенных карбонатов гидросферы в органические соединения, лишив тем самым пищи зеленые растения. Примерно столько же времени необходимо для минерализации всего органического вещества биосферы, ведущей к исчезновению источника питания гетеротрофных организмов. При столь высокой скорости биотического круговорота устойчивость биосферы может быть обеспечена только на основе эффективных механизмов регулирования интенсивности синтеза и минерализации органического вещества. Роль такого механизма, напоминающего механизм регулирования численности особей в системе «хищник-жертва», выполняет **отрицательная обратная связь между процессами продукции и деструкции**. Если сбалансированность продукционно-деструкционных процессов нарушается и образуется избыток органического вещества, происходит снижение продукции вследствие ухудшения питания автотрофных организмов, связанного с уменьшением количеств минеральных веществ, перешедших в органическую форму. Наоборот, усиление активности гетеротрофных организмов, приводящее к поступлению в биосферу дополнительных количеств минеральных компонентов, сопровождается, с одной стороны, улучшением питания организмов-продуцентов и ростом продукции органического вещества, а, с другой стороны, ведет к уменьшению запасов органических форм питательных веществ, необходимых для жизнедеятельности гетеротрофов со всеми вытекающими для них негативными последствиями.

Все вышеизложенное в отношении механизма регулирования продукционно-деструкционной составляющей биосферного круговорота справедливо только при отсутствии или пренебрежимо малой интенсивности массообмена между биосферой и ее абиотическим окружением. В случае неполной замкнутости биосферного круговорота безвозвратное выведение за пределы биосферы части пищевых ресурсов, как минеральных, так и органических, является фактором устойчивости, жестко ограничивающим продолжительность жизни на Земле. Основным путем удаления веществ из биосферы служат процессы осадкообразования в Мировом океане. Результаты расчетов геохимического баланса углерода (табл. 9–1), в котором учтен вклад атмосферного CO<sub>2</sub> в материковом стоке, позволяет определить количество выводимых из биосферы биологически доступных форм углерода (580 млн т С/год) по разности общего количества уг-

лерода в донных отложениях (1049 млн т С/год), количество неорганического и органического углерода неатмосферного генезиса в материковом стоке (соответственно 286 и 129 млн т С/год) и углерода, поступающего в океан при дегазации базальтовых магм (54 млн т С/год). При такой скорости удаления биологически доступного углерода и его суммарном содержании в биосфере порядка  $5 \times 10^7$  млн т С необходимо всего лишь 85 тыс. лет, чтобы полностью лишит биоту Земли нужных ей питательных веществ! Не может быть никаких сомнений в том, что устойчивость биосферы, существующей более 3 млрд лет, должна поддерживаться каким-то внешним процессом, выступающим в качестве отрицательной обратной связи.

Таблица 9–1

**Баланс углерода в современном океане**  
(в скобках приведены оценки вклада  $\text{CO}_2$ , поступившего из атмосферы)

Статья баланса	Баланс углерода, млн т С/год		
	$\text{C}_{\text{неорг}}$	$\text{C}_{\text{орг}}$	$\sum \text{C}$
<i>Поступление</i>			
Материковый сток растворенных веществ	818 (674)	818 (674)	818 (674)
Материковый сток твердых веществ	787 (516)	787 (516)	787 (516)
Дегазация базальтовых магм	54 (0)	54 (0)	54 (0)
<b>ИТОГО</b>	<b>1659 (1190)</b>	<b>1659 (1190)</b>	<b>1659 (1190)</b>
<i>Выведение</i>			
Осадкообразование	883	166	1049
Вынос в атмосферу	584*	26	610
<b>ИТОГО</b>	<b>1467</b>	<b>192</b>	<b>1659</b>

\* Оценено по разности приходных и расходных статей геохимического баланса углерода в современном океане.

Такой процесс геохимии известен и заключается в преобразовании осадочных пород, которые после выхода из биосферы опускаются вглубь земной коры и оказываются в условиях высокотемпературных фаций метаморфизма гранитно-метаморфической и гранулит-базитовой оболочек, где происходит высвобождение летучих компонентов, в том числе соединений углерода ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ), и возвращение их в биосферу в составе метаморфогенных флюидов. О потерях углерода при метаморфизме можно судить по средним содержаниям неорганического и органического углерода в осадочной и гранитно-метаморфической оболочках<sup>2</sup> (табл. 9–2). Как видно из приведенных цифр, при метаморфизме осадочных пород теряется около 90% углерода, который затем возвращается в биосферу. На самом деле степень регенерации углерода должна быть существенно выше, поскольку уже на самой первой ста-

<sup>2</sup> Гранулит-базитовая оболочка до сих пор недоступна для непосредственного изучения.

дии преобразования донных отложений в осадочные породы — стадии диагенеза — теряется значительная часть углерода, о чем свидетельствуют прямые измерения потоков растворенных и газообразных форм углерода на границе раздела вода-дно.

Таблица 9–2

### Изменение содержания углерода при метаморфизме осадочных пород

Объект	Баланс углерода, млн т С/год		
	С <sub>неорг</sub>	С <sub>орг</sub>	∑ С
Осадочная оболочка	2,10	0,46	2,56
Гранитно-метаморфическая оболочка	0,25	0,05	0,30
Разность (потери углерода при метаморфизме)	1,85	0,41	2,26

Источник: Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 181 с.

Кроме возвратных потоков углерода с метаморфическими флюидами, существуют направленные (односторонние) потоки, связанные с выносом из мантии летучих компонентов. Мощность этого источника в настоящее время определить очень трудно, но по самым приближенным оценкам он значительно уступает метаморфогенной дегазации, составляя менее 1% ее интенсивности.

Для устойчивости биосферы имеет значение то, что степень метаморфической регенерации подвижных форм углерода не зависит от абсолютного содержания углерода в исходных осадочных породах. Это приводит к возникновению между биосферой и ее абиотическим окружением отрицательной обратной связи: чем больше углерода выводится из биосферы в составе осадочных пород, тем большее его количество возвращается обратно в биосферу с метаморфогенными флюидами.

Рассмотренный на примере углерода **механизм метаморфического рециклинга** имеет большое значение для химических элементов, образующих летучие соединения (N, S, H, I и др.), возвращающихся в биосферу преимущественно в составе метаморфогенных флюидов. Однако часть биогенных элементов, например, фосфор, показывает инертное поведение в процессах метаморфизма и возвращается в биосферу в составе метаморфических пород только в результате подъема последних в процессе орогенеза (горообразования). Для этих элементов биогеохимическая роль метаморфизма заключается в изменении форм нахождения: химические соединения, устойчивые при низких температурах и труднодоступные для биоты, превращаются в соединения, устойчивые при высоких температурах, но неустойчивые в условиях биосферы и способные по этой причине участвовать в создании минерально-пищевой базы автотрофных организмов.

Таким образом, устойчивость биосферного круговорота веществ и биосферы в целом, для которой этот круговорот является системообразующим процессом, контролируется двумя отрицательными обратными связями. Одна из них, внутренняя, проявляется в форме компенсационного сопряжения процессов биологического синтеза и минерализации органического вещества. Другая, внешняя отрицательная связь связывает биосферу с ее абиотическим окружением посредством метаморфического рециклинга, который обеспечивает прямую пропорциональность исходящих из биосферы и возвращающихся в нее потоков вещества.

### ЕСТЕСТВЕННЫЙ ОТБОР БИОКОСНЫХ СИСТЕМ И ЭВОЛЮЦИЯ БИОСФЕРЫ

Если известны закономерности эволюции какой-либо системы, можно с той или иной долей вероятности предсказать ее будущее состояние, а при знании механизмов эволюционного процесса можно на него воздействовать сообразно поставленным целям. Уровень современных знаний не дает оснований считать существующие представления достаточными для более или менее обоснованных суждений о механизмах эволюции биосферы. В то же время, сведения о развитии биосферы и ее окружения на протяжении всей геологической истории, полученные науками о Земле, геохимией в частности, позволяют установить некоторые эмпирические закономерности эволюционного процесса и в их свете проанализировать подходы к выработке стратегии устойчивого развития.

На протяжении всей истории своего существования биосфера претерпевала необратимые изменения, которые происходили как в биотических, так и в абиотических компонентах. Свидетельством первых является собственно биологическая эволюция, проявлявшаяся в появлении одних видов организмов и исчезновении других; вторых — направленные тренды изменения минерального и химического составов осадочной оболочки Земли, связанные с внутрибиосферными процессами. Все эти изменения происходили в соответствии с **фундаментальным законом естественного отбора устойчивых состояний**, согласно которому в окружающем мире количественно преобладают объекты, находящиеся в состоянии относительной устойчивости. Неустойчивые состояния имеют меньшее время жизни и соответственно реже наблюдаются. Результатом этого является «замещение» неустойчивых состояний устойчивыми и эволюционное движение в сторону максимальной устойчивости, допускаемой внешними условиями.

Эволюция какой-либо системы означает процесс изменения ее состояния без нарушения свойственной ей определенной формы структурно-функциональной организации. Если структурно-функциональная организация изменяется, это означает прекращение существования данной системы. Сохранение определенной формы организации — видového признака различных природных объектов — есть необходимое условие эволюционного процесса. Гомеостаз биосферы может быть согласован с фактом необратимой эволюции только в том

случае, если траектория развития проходит в фазовом пространстве ее состояний по «каналу устойчивости», т.е. по квазистационарной траектории. Это означает, что должны существовать весьма жесткие ограничения на переход от текущего состояния к последующему, и эти ограничения определяются текущим состоянием.

Что же определяет следование биосферы по квазистационарной траектории развития и в чем заключаются механизмы эволюции биосферы как совокупности биокосных систем?

Биогеоценозы являются наименьшими биогеохимическими единицами — «особями» биосферы, в которых живое и косное вещество объединено биотическим круговоротом, выступающим в качестве специфической формы структурно-функциональной организации. Их наблюдаемое разнообразие значительно меньше числа возможных сочетаний, составленных из встречающихся на Земле различных видов организмов и экотопов. Можно предположить, что так же как большинство биологических мутаций устраняется естественным отбором и не ведет к появлению новых видов, в биосфере происходит «отсев» большинства теоретически допустимых, но не выдерживающих конкуренции биогеоценозов.

Для понимания причин и механизмов эволюции биокосных систем всех уровней имеют значение несколько положений аксиоматического характера, которые могут быть выстроены в следующий логический ряд.

1. Биосфера и составляющие ее биокосные подсистемы могут существовать, только находясь в состоянии сильной термодинамической неравновесности.

2. Все проходившиеся в ходе эволюции неравновесные состояния биосферы одновременно являются квазистационарными и локально устойчивыми, в силу чего положение эволюционной траектории в фазовом пространстве состояний биосферы никогда не выходило за пределы «каналов» локальной устойчивости.

3. Для биосферы как сильно неравновесной системы существует большое число возможных состояний, из которых реализуются только немногие, что формально соответствует действию процессов регулирования. Естественный отбор биогеоценозов есть, по существу, выбор возможных состояний.

4. На состояние биосферы оказывает влияние состояние окружающей ее среды (внутренних частей Земли и ближнего Космоса, главным образом, Солнца), но ответное воздействие пренебрежимо мало. В силу этого обстоятельства существует два центра регулирования биосферы: внутриземной и космический, которые накладывают ограничения на возможные состояния биосферы и таким образом производят «выбор» эволюционной траектории.

5. Естественный отбор биогеоценозов направлен на достижение наибольшей локальной устойчивости и максимальной потенциальной вариантности состояний в условиях наложения ограничений со стороны внутриземного и космического центров регулирования.

6. Устойчивость биогеоценозов, как любых биокосных систем, определяется устойчивостью и силой отрицательных обратных связей энергомассообмена между живым и косным веществом и, поскольку эти связи проявляются



в форме биотического круговорота, устойчивость последнего есть объективная характеристика адаптированности биогеоценозов к текущим условиям существования.

7. Количественным критерием устойчивости биотического круговорота является его интенсивность, которая при прочих равных условиях увеличивается с ростом внутренней термодинамической неравновесности биокосных систем.

8. В ходе естественного отбора преимуществом «выживания» обладали биогеоценозы с наиболее интенсивным биотическим круговоротом и максимальной термодинамической неравновесностью. В результате в течение геологического времени степень неравновесности биосферы возрастала, что сопровождалось увеличением числа возможных траекторий ее дальнейшего развития. Это способствовало расширению числа возможных ответных гомеостатических реакций на изменение состояния внешней среды и переходу к еще более устойчивому состоянию.

Ключевым вопросом является механизм естественного отбора, действующего на уровне биогеоценозов. Зная тенденции геохимической эволюции внешних оболочек Земли и сделав определенные предположения в отношении системообразующих процессов в биокосных системах, можно попытаться обозначить **механизмы естественного отбора биогеоценозов и эволюции биосферы.**

Будем исходить из того, что в биогеоценозах системообразующим процессом является биотический круговорот. Биогеоценоз как таковой существует до тех пор, пока биотические и абиотические компоненты связаны между собой потоками вещества и энергии, которые всегда оформлены в виде биотического круговорота вещества. Поскольку биотический круговорот является системообразующим процессом, его устойчивость может считаться одновременно показателем устойчивости биогеоценозов. Отсюда следует, что механизм естественного отбора связан с отсевом биогеоценозов с низкой интенсивностью биотического круговорота.

Адаптация организмов к условиям окружающей среды всегда сопровождается затратой энергии, и, согласно экологическому правилу С.С. Шварца, в ходе эволюции наблюдается тенденция к большей экономии затрат энергии на адаптацию. Сходное явление отмечается и в эволюции биогеоценозов. А.И. Перельман [3], анализируя связь между биомассой ( $B$ ) и продукцией ( $P$ ) различных типов и семейств ландшафтов, которая аппроксимируется степенной функцией  $P = B^k$ , обратил внимание на то, что коэффициент  $k$  закономерно увеличивался по мере эволюции растительного покрова от голосеменных лесов (хвойно-гингковая тайга), появившихся в середине пермского периода, к покрытосеменным лесам, возникшим в середине мелового периода, и до существующих с неогена степей и саванн с покрытосеменными травянистыми растениями. В фанерозое, для которого установлена указанная зависимость, светимость Солнца мало отличалась от современного значения. Поэтому рост величины  $k$  означает увеличение эффективности использования солнечной энергии на единицу массы живого вещества в биотическом круговороте, являющемся не только систе-

мообразующим процессом в биогеоценозах, но и способом адаптации (с помощью изменения замкнутости) к окружающей абиотической среде.

Для понимания сущности естественного отбора биогеоценозов и биокосных систем в целом большое значение имеет принцип максимального использования энергии Г. и Э. Одумов [2], согласно которому в соперничестве между собой выживают те системы, которые наилучшим образом способствуют поступлению и использованию энергии. С этой целью система

- создает накопители (хранилища) высококачественной энергии;
- затрачивает часть накопленной энергии на обеспечение поступления новой энергии;
- обеспечивает кругооборот различных веществ;
- создает механизмы регулирования, поддерживающие устойчивость системы и ее способность к адаптации к изменившимся условиям;
- налаживает обмен с другими системами, необходимый для обеспечения потребностей в энергии специальных видов.

Очевидно, что системы, уступающие другим по этим показателям, являются менее устойчивыми и со временем «вымирают», т.е. устраняются в ходе естественного отбора.

Принцип максимального использования энергии находит отражение в устройстве и некоторых эволюционных изменениях биосферы. Пространственное разделение окисленных и восстановленных продуктов фотосинтеза, или редокс-поляризация биосферы<sup>3</sup>, обеспечивает накопление высококачественной химической энергии, запасы которой увеличивались во времени, и в течение всей известной геологической истории существования жизни на Земле происходило нарастание внутренней термодинамической неравновесности биосферы. Подтверждением справедливости этого положения служат данные об эволюции химического состава осадочных пород.

Химическая неравновесность биосферы создается в основном за счет перехода при фотосинтезе части энергии солнечного излучения в избыточную свободную энергию органических соединений и поддерживается благодаря пространственному разделению продуктов фотосинтеза: газообразный кислород накапливается в атмосфере, органическое вещество концентрируется на поверхности и в самых верхних слоях литосферы (почвах и донных отложениях водоемов). До тех пор, пока органическое вещество находится в биосфере, оно в высшей степени неустойчиво и быстро перерабатывается гетеротрофными организмами. Только выйдя за пределы биосферы, становясь компонентом осадочных пород, органическое вещество утрачивает непосредственную связь с биотой и кислородом атмосферы и резко повышает свою устойчивость. Осадочные породы и вне биосферы содержат окислители органического вещества (сульфатную

---

<sup>3</sup> *Примеч. ред.:* Редокс — общепринятый во всем мире термин, который обозначает два противоположных физических процесса: восстановление (*reduction*) и окисление (*oxidation*). В более широком контексте является своего рода научным символом равновесия.

серу, оксигидроксиды железа (III), диоксид марганца), но без участия живых организмов окисление идет чрезвычайно медленно, и можно предположить, что концентрации компонентов главных редокс-систем в осадочных породах отражают синхронное с их образованием редокс-состояние биосферы.

Если с этих позиций рассматривать данные по эволюции химического состава осадочных пород (рис. 9-1), то выясняется важная закономерность, согласно которой с течением времени на фоне общего роста концентрации органического углерода (восстановителя) наблюдается одновременное увеличение содержания окисленных компонентов в главных редокс-системах: окисного-закисного железа и сульфатной-сульфидной серы.

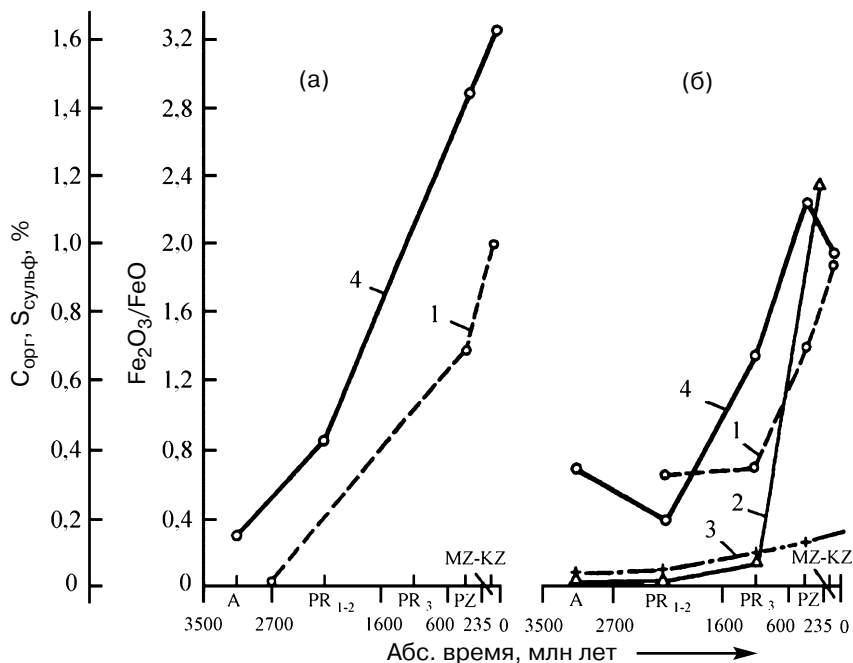


Рис. 9-1. Эволюция содержания органического углерода (1), сульфатной (2) и пиритной (3) серы, а также величины отношения окисного железа к закисному (4) в осадочных породах Северо-Американской (а) и Русской (б) платформ

Источник: Ронов А.Б. Осадочная оболочка Земли. М.: Наука, 1980. 79 с.

Отмеченная тенденция не может быть связана с приближением к равновесию вещества осадочных пород, происходящим за пределами биосферы, и показывает, что вещество, выходящее из биосферы и дающее начало осадочным породам, с течением времени становилось все более неравновесным. Отсюда следует вывод о том, что эволюция биосферы шла в направлении увеличения ее внутренней неравновесности в полном соответствии с первым положением принципа максимального использования энергии Г. и Э. Одумов.

Увеличение в течение геологического времени внутренней термодинамической неравновесности биосферы, равно как увеличение интенсивности биогеоценотического и биосферного круговоротов вещества, может рассматриваться как свидетельство увеличения устойчивости биогеоценозов и биосферы в целом. Эта тенденция эволюционного процесса должна быть сохранена при реализации любых стратегий устойчивого развития.

### **ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ**

Очень вероятно, что в течение геологического времени биосфера не раз приближалась к пределу области устойчивости, но оставалась все же на квазистационарной траектории развития благодаря происходившим изменениям в структурно-функциональной организации. Появление человека привело к тому, что состояние биосферы стало зависеть от хозяйственной деятельности, которая вошла в противоречие с эволюционно сложившейся формой структурно-функциональной организации биотических и абиотических процессов и стала причиной схода биосферы с квазистационарной устойчивой траектории эволюции. Стратегия устойчивого развития, призванная устранить это противоречие, должна предусматривать выработку таких действий, которые были бы способны поддерживать устойчивость биосферы в условиях дальнейшего роста промышленного и аграрного производства.

С геохимической точки зрения хозяйственная деятельность — это процесс энергомассообмена между природой и созданной человеком глобальной технологической системой, имеющей на входе потребляемые материальные и энергетические ресурсы, а на выходе — только отходы. Биосфера вместе с глобальной технологической системой с хорошим приближением может рассматриваться как закрытая термодинамическая система, способная обмениваться с внешней средой энергией. Закрытые системы могут неопределенно долго находиться в неравновесном стационарном состоянии или двигаться по квазистационарной траектории развития за счет использования внешних потоков энергии. При наличии внутри таких систем каких-либо макроскопических процессов необходимым условием сохранения устойчивости является организованность последних в форме замкнутых циклов. Современная цивилизация нарушила условия устойчивости, создав глобальную технологическую систему с незамкнутым циклом производственных процессов (*рис. 9–2а*), видимым проявлением чего стали не утилизируемые отходы. Устойчивое неравновесное состояние биосферы может быть достигнуто только в случае рециклинга отходов и превращения их во вторичные ресурсы (*рис. 9–2б*).

Рециклинг ресурсов в принципе представляет собой тот путь, который позволяет решить проблему их сохранения для будущих поколений. Имеются лишь ограничения на масштабы рециклинга, определяемые количеством и видами источников энергии, которая может быть использована человеком в этих целях. Только энергия является истинно невозобновляемым ресурсом. Автономный рециклинг энергетических ресурсов невозможен в соответствии со вто-

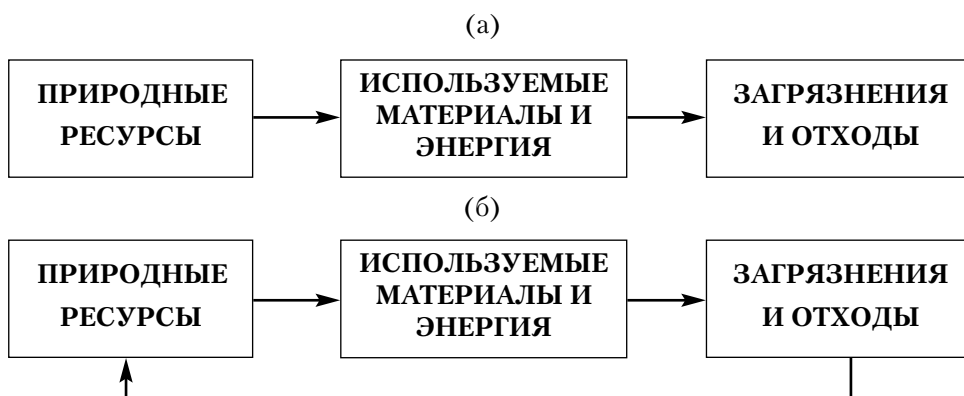


Рис. 9–2. Структурные схемы современных (а) и ноосферных (б) технологий

рым законом термодинамики, но широкое использование космической и, прежде всего, солнечной энергии открывает путь для сохранения всех других видов ресурсов.

Если рассматривать в совокупности все технологические процессы, осуществляемые человеком, то становится ясно, что самопроизвольное образование ресурсов из отходов невозможно без затрат энергии, которая сама является ресурсом. Экологически допустимое потребление энергетических ресурсов помимо всего прочего лимитируется устойчивостью процессов энергомассопереноса в биосфере: существует предел изъятия энергии для технологических процессов, за которым следует разрушение действующей формы структурно-функциональной организации и переход к новой форме. Лимиты потребления энергии в технологических целях, определяемые устойчивостью биосферы, являются наиболее жесткими.

Во взаимоотношениях природы и человека всегда решался и сейчас решается один вопрос: как человеку с наименьшими затратами взять у природы максимально больше ресурсов. Вопрос о том, имеются ли у самой природы «потребности» и что надо сделать для их удовлетворения, никогда не стоял. Иными словами, в принципах современной хозяйственной деятельности игнорируется существование обратных связей и отсутствует целевое регулирование процессов энергомассообмена между человеком и природой, направленное на достижение совместного, устойчивого развития. В результате в окружающую среду поступают огромные количества веществ, ненужных не только человеку, но и природе. Эти вещества природой не утилизируются и становятся загрязнением, ухудшая состояние среды обитания человека.

Очевидно, что сохранение природного геохимического фона в биосфере возможно в том случае, если для любой ее подсистемы соблюдается равенство нулю суммы входящих и выходящих потоков ( $J$ ) химических веществ ( $i$ ):

$$\sum J_i = 0.$$

Данное равенство является математической формулировкой **первого геохимического принципа устойчивого развития**, согласно которому хозяйственная деятельность не должна существенно нарушать сбалансированность миграционных потоков веществ, присущую текущему состоянию биосферы. Данная формулировка допускает незначительное нарушение сбалансированности потоков и не утверждает необходимость точного соблюдения баланса. Последнее условие имеет принципиальное значение по следующей причине.

Полная и перманентная сбалансированность потоков вещества и энергии для биосферы означает запрет на эволюцию и невозможность адаптации к изменениям внешних условий, которые происходили на протяжении всей геологической истории и которые, несомненно, будут происходить и в будущем. Находясь в устойчивом стационарном состоянии, динамическая система способна эволюционировать, изменяя свою структурно-функциональную организацию в результате адаптации к действию внешних сил или каких-либо внутренних процессов. Если происходящие при этом изменения состояния системы не выходят за пределы устойчивости, то эволюция идет по устойчивой квазистационарной траектории развития, при которой кризисные явления либо не реализуются вообще, либо выражены слабо.

Сбалансированность потоков вещества и энергии достигается как при устойчивом, так и при неустойчивом стационарном состоянии динамической системы. Очевидно, что при неустойчивом стационарном состоянии квазистационарный ход эволюционного развития невозможен, поскольку даже малые возмущения могут вывести систему из состояния динамического равновесия и спровоцировать быстрый переход к новой форме структурно-функциональной организации, т.е. вызвать кризисные явления.

Другое важное замечание в отношении первого геохимического постулата устойчивого развития заключается в том, что условие устойчивого стационарного состояния должно выполняться для всей биосферы. Мнение о том, что биота может полностью регулировать состояние окружающей среды, не соответствует действительности. Это следует хотя бы из того известного факта, что пространственные взаимоотношения материков и океанов, горных хребтов и равнин и другие явления, имеющие своей причиной процессы, происходящие в глубинах Земли, оказывают самое непосредственное влияние на климат планеты, который в этой части биоте не подвластен. Устойчивое стационарное состояние биоты не может считаться достаточным условием для сохранения экологических параметров биосферы в диапазоне значений, свойственных естественной биосфере.

Сохранение существующей сбалансированности миграционных потоков не предполагает полной неизменности абсолютных величин динамических параметров биосферы. Как видно из *рисунка 9–3*, на котором изображены потоки веществ ( $J$ ) в простейшей трехрезервуарной динамической системе, условие сбалансированности может выполняться при множестве различных абсолютных величин каждого из потоков в отдельности. Необходимо только, чтобы для каждого из резервуаров мощности входящих и выходящих потоков любого химического компо-

нента были равны между собой. Применительно к интересующей нас проблеме это означает, что имеется возможность для роста интенсивности хозяйственной деятельности при сохранении существующей химической структуры биосферы, т.е. возможно снижение экологических ограничений на пределы роста за счет ускорения миграции вещества в направлении, противоположном направлению его миграции в технологических потоках. Данное условие, которое можно назвать **вторым геохимическим принципом устойчивого развития**, составляет основу для разработки новых принципов взаимоотношений человека с биосферой при переходе общества на путь устойчивого развития.

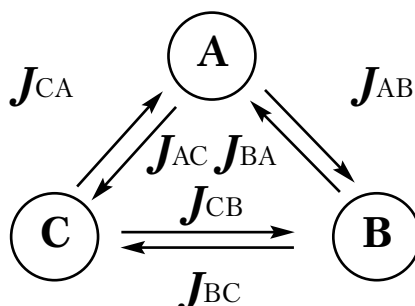


Рис. 9–3. Потоки веществ в простейшей трехрезервуарной системе

Нельзя, однако, считать, что таким способом можно вообще преодолеть экологические ограничения на расширение хозяйственной деятельности. Ускорение компенсирующих потоков вещества связано с затратами энергии, возобновимые и невозобновимые ресурсы которой ограничены. По-видимому, самые жесткие ограничения на пределы роста накладывает энергетическая структура биосферы и, в частности, допустимая мощность утилизируемых энергетических потоков, при которой биосфера сохраняется в устойчивом состоянии, приемлемом для биологического существования человека. Таких состояний может быть достаточно много и некоторые из них, вероятно, имеют преимущества перед ныне существующей формой структурно-функциональной организации биосферы.

Как уже говорилось, одним из факторов повышения устойчивости эволюционного процесса было усиление с течением времени внутренней термодинамической неравновесности биосферы за счет пространственного разделения и накопления неравновесных продуктов фотосинтеза. Основная доля потребляемой энергии получается человеком при сжигании ископаемого топлива, т.е. в результате расходования ранее аккумулированной биосферой энергии Солнца. Многие другие виды хозяйственной деятельности (земледелие, лесное хозяйство и др.) также уменьшают количество органического углерода и снижают степень неравновесности биосферы. Эти техногенные процессы в энергетическом отношении ничем не отличаются от метаболизма гетеротрофных организмов, биомасса которых лимитируется количеством доступ-

ной энергии растительной пищи. Точно так же техногенный метаболизм лимитируется количеством доступной энергии, связанной с неравновесностью биосферы — ее избыточной свободной энергии, созданной живыми организмами и необходимой им для устойчивого существования. Отсюда следует **третий геохимический принцип устойчивого развития**: хозяйственная деятельность не должна приводить к уменьшению избыточной свободной энергии и внутренней термодинамической неравновесности биосферы.

Современная цивилизация использует небиогенную свободную энергию радиоактивного распада, движения водных, воздушных масс и др. в ограниченных масштабах и поэтому зависима от биосферы, уничтожая накопленный за миллиарды лет энергетический потенциал. Энергетическая зависимость человека от биосферы может снизиться, если удастся освоить энергию термоядерного синтеза или найти эффективные способы преобразования энергии солнечного излучения, и это будет важный шаг на пути к устойчивому развитию.

\* \* \*

В стремлении к устойчивому развитию интересы человека и биосферы могут совпадать не полностью. Для биосферы достаточно устойчивости любого состояния, допускающего продолжение жизни на Земле. Для человека, если он желает выйти за пределы биологического существования, приемлемы только такие состояния, при которых устойчивость биосферы сочетается с возможностью дальнейшего развития хозяйственной деятельности. Можно сказать, что пространство устойчивых эволюционных траекторий развития ноосферы уже, чем биосферы, но является частью последнего. Поэтому интересы человека и биосферы совпадают лишь частично, и главная задача человечества состоит в том, чтобы направить эволюционный процесс по нужной ему траектории устойчивого развития. Интересы биосферы при этом будут соблюдены. Это и есть истинная коэволюция человека и природы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Вернадский В.И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1987. 339 с.
2. *Одум Г., Одум Э.* Энергетический базис человека и природы. М.: Прогресс, 1978. 379 с.
3. *Перельман А.И.* Масса живого вещества как параметр ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1970. №5. С. 10–16.
4. *Ронов А.Б.* Осадочная оболочка Земли. М.: Наука, 1980. 79 с.
5. *Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А.* Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 181 с.
6. *Савенко В.С.* Геохимические аспекты устойчивого развития. М.: ГЕОС, 2003. 180 с.
7. *Савенко В.С.* Что такое жизнь? Геохимический подход к проблеме. М.: ГЕОС, 2004. 203 с.