

В.С. САВЕНКОМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, Alla_Savenko@rambler.ru**ЭКОСФЕРА И БИОСФЕРА**

Обоснована необходимость выделения более крупной, чем биосфера, глобальной экосистемы геосферного ранга — экосферы. Определены границы экосферы, которая включает в себя все живое вещество планеты, атмосферу до термосферы, всю гидросферу и верхнюю часть литосферы с метаморфической оболочкой. В пределах этого пространства реализуется большой геологический круговорот, связывающий биосферу и ее абиотическое окружение в единое целое и создающий специфическую форму его структурно-функциональной организации. Большой геологический круговорот вещества выполняет в экосфере функцию системообразующего циклического процесса, который не обладает полной замкнутостью. Главным фактором, контролирующим степень замкнутости геологического круговорота, служит обмен веществом на границе литосфера–мантия. Процессы метаморфизма, происходящие за пределами биосферы, представляют собой механизм организации экосферы, который в течение длительного времени поддерживает существование жизни на Земле: они производят регенерацию продуктов биосферного метаболизма и обеспечивают их возврат в биосферу в формах, доступных для повторного потребления живыми организмами. Характерным признаком пространства экосферы является редокс-неравновесность, обусловленная деятельностью живых организмов. В экосфере совершается полный жизненный цикл: от образования живых организмов из минеральных компонентов до полного превращения в исходные минеральные составляющие живого вещества и всех продуктов биосферного метаболизма. За пределами экосферы нет ни живых организмов, ни продуктов их жизнедеятельности, сохранивших приобретенную в биосфере термодинамическую неравновесность.

Ключевые слова: глобальные экосистемы, большой геологический круговорот, системообразующий процесс, редокс-неравновесность, механизм организации экосферы.

V.S. SAVENKOM.V. Lomonosov Moscow State University,
119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia, Alla_Savenko@rambler.ru**ECOSPHERE AND BIOSPHERE**

The necessity of identifying a larger (than the biosphere) global ecosystem of geospheric rank, the ecosphere, was substantiated. The boundaries of the ecosphere were determined, which includes all living matter of the planet, the atmosphere up to the thermosphere, the entire hydrosphere and the upper part of the lithosphere with the metamorphic layer. Within this space, a great geological cycle is realized, linking the biosphere and its abiotic environment into a single whole and creating a specific form of its structural and functional organization. The great geological cycle of matter performs the function of a system-forming cyclic process in the ecosphere, which does not have complete closedness. The main factor controlling the degree of closedness of the geological cycle is the exchange of matter at the boundary between the lithosphere and the mantle. The processes of metamorphism occurring outside the biosphere constitute the mechanism of ecosphere organization, which has long supported the existence of life on Earth: they regenerate the products of biospheric metabolism and ensure their return to the biosphere in forms available for re-consumption by living organisms. A characteristic feature of the ecosphere space is the redox nonequilibrium caused by the activity of living organisms. In the ecosphere, a complete life cycle takes place from the formation of living organisms from mineral components to complete transformation into the initial mineral components of living matter and all products of biospheric metabolism. Outside the ecosphere there are neither living organisms nor products of their vital activity that have retained the thermodynamic nonequilibrium acquired in the biosphere.

Keywords: global ecosystems, great geological cycle, system-forming process, redox nonequilibrium, mechanism of ecosphere organization.

ВВЕДЕНИЕ

В 1962 г. Б.Л. Личков, анализируя состояние наук о Земле, отмечал резкое разделение на науки геологические и географические, почти не пересекающиеся в объектах своих исследований при оче-

видной необходимости объединения усилий в деле создания общей теории Земли [1]. К сожалению, и сейчас, 60 лет спустя, приходится констатировать, что географические и геологические науки разобщены столь же сильно, как и прежде. Даже попытка такого авторитетного ученого, как А.А. Григорьев [2, 3], включить в объект изучения географии географическую оболочку — область протекания тектономагматических процессов — и таким образом обозначить непосредственный контакт с геологией не увенчалась успехом. До сих пор область географических исследований не выходит за границы ландшафтной оболочки (климатической системы).

Вместе с тем в современных географии и геологии сформировались и стали быстро развиваться многочисленные экологические направления, предметом изучения которых являются различные взаимоотношения живых организмов, включая человека, с окружающей средой — географической и геологической в равной степени. Именно в экологических исследованиях наметилась реальная связь географии и геологии.

Несмотря на то что география и геология имеют собственный богатый опыт системного изучения природы, объединительным началом для них стало сформулированное в экологии понятие экосистемы [4]. По современным воззрениям, экосистемы образуют многоуровневую иерархию, на нижней ступени которой располагаются биогеоценозы (элементарные экосистемы), а вершину занимает биосфера — наиболее крупная экосистема, представляющая собой структурированную совокупность всех экосистем Земли более низких уровней [5, 6]. Жизнь на Земле с этой точки зрения — явление всецело биосферное. Некоторые факты, однако, позволяют усомниться в справедливости таких представлений и дают основание полагать, что системное рассмотрение жизни на Земле не может ограничиваться биосферой и должно включать также абиотическое окружение последней [7].

Цель настоящей работы состоит в обосновании существования более крупной, чем биосфера, экосистемы геосферного уровня — экосферы, функционирование и развитие которой обусловлено совместным протеканием процессов, изучаемых как в географии, так и в геологии.

РАЗЛИЧНЫЕ ТОЛКОВАНИЯ ПОНЯТИЯ «ЭКОСФЕРА»

Первое использование этого термина обычно связывают с Л. Колом [8], который называл экосферой сумму всего живого вместе с глобальной окружающей средой и всеми земными ресурсами, т. е., по существу, то, что В.И. Вернадский считал биосферой. В большинстве отечественных и зарубежных работ понятия «экосфера» и «биосфера» рассматриваются как синонимы [9–12]. Близкой точки зрения придерживалась Г.С. Макунина [13], которая назвала экосферой ландшафтообразующее и жизнеобеспечивающее ядро географической оболочки, пространственно ограниченное областью активного климатического влагооборота, где сосредоточено практически все живое вещество планеты.

В связи с тенденцией последних лет толковать экологию как науку о взаимоотношениях человека с окружающей средой, экосферой предлагали именовать также область обитания и деятельности человека, т. е. измененную человеком биосферу [14–17]. Появление человека принято связывать с началом новой стадии эволюции биосферы, которой В.И. Вернадский дал название «ноосфера» [18]. Замена этого устоявшегося понятия на новое — экосфера — не имеет никаких преимуществ и ничем не оправдано.

Некоторые авторы предлагали называть экосферой среду, окружающую биосферу. Например, А.В. Иванов [19] относил к экосфере, с одной стороны, все внутреннее пространство Земли, находящееся глубже нижней границы биосферы, а с другой — космическое окружение планеты, охватывающее все пространство Солнечной системы. Н.Ф. Реймерс [5], не уточняя границ экосферы, также считал, что для биосферы экосфера как в пространственном, так и в функциональном отношении является внешним объектом. отождествление экосферы со средой, в которой существует и развивается биосфера, только по принципу наличия воздействия этой среды на биосферу представляется в высшей степени неконкретным, поскольку позволяет включить в экосферу не только мантию и ядро Земли, но и все внеземное пространство Солнечной системы, а также дальний космос.

Таким образом, во всех упомянутых случаях понятие «экосфера» используется либо в качестве синонима известных и широко употребляемых терминов, либо не имеет четкого определения, позволяющего однозначно провести границы соответствующего ей пространства.

ЭКОСФЕРА, ЗЕМНАЯ КОРА, МЕГАБИОСФЕРА

Имея цель доказать необходимость выделения экосферы в качестве планетарной геосистемы геосферного ранга, мы должны прежде всего показать, в чем состоит принципиальное различие эко-

сферы и биосферы, раскрыть в главных чертах специфику системообразующего процесса и обосновать критерии, по которым можно установить границы экосферы.

Обсуждение первого вопроса — существования принципиального различия биосферы и экосферы — имеет смысл начать с рассмотрения семантических возможностей слова «экосфера». Оно имеет два корня и происходит от греческих слов *oikos* (дом, жилище) и *sphera* (сфера, шар). Очевидно, что данный термин может использоваться только для обозначения пространства, являющегося «жилищем» для живых организмов, в том числе для человека. После основополагающих работ В.И. Вернадского утвердилось представление о биосфере как об области существования живых организмов, где происходит их непосредственное взаимодействие с окружающей средой. В связи с этим возникает мысль о тождественности биосферы и экосферы и избыточности последнего термина. Однако подобная логика рассуждений не вполне корректна. «Экология» в дословном переводе — это наука об организмах «у себя дома», об их взаимоотношениях между собой и с «жилищем», в котором они находятся. Однако в любом строении, кроме жилых, имеются помещения, не приспособленные для проживания, без которых тем не менее само проживание становится невозможным. Дом не может быть без фундамента, стен, крыши и других необитаемых элементов строения, которые делают его единой, функционально целостной системой. Основываясь на этой аналогии, можно допустить, что реальное экологическое пространство может быть шире его обитаемой части.

По определению В.И. Вернадского [20], биосфера соответствует только «жилым» помещениям, где живые организмы находятся физически (это подчеркивается указанием, что вся биосфера сложена биокосным веществом). В ее состав не должно входить все то земное пространство, в котором живые организмы не обитают, но где протекают необходимые для поддержания жизни на Земле процессы, например регенерация в зоне метаморфизма усвояемых форм биогенных элементов из образующихся в биосфере неусвояемых форм — так называемых биосферных метаболитов [7, 21]. Включенное в большой геологический круговорот, это «нежилое» пространство в функциональном отношении неотделимо от биосферы, оно образует вместе с ней единую систему, которую можно назвать экосферой в полном соответствии со смысловым содержанием данного термина. В этом случае биосфера оказывается частью, подсистемой экосферы. Ранее на ошибочность представлений о биосфере как об обособленной самоуправляемой системе указывал Б.С. Соколов, который подчеркивал, что биосфера функционирует только благодаря неразрывной связи с другими геосферами, образуя вместе с ними планетарную экосистему первого порядка [22].

То, что мы обсуждаем и называем экосферой, в первой половине XX в. имело другое определение — земная кора, которая объединяла атмосферу, гидросферу, верхние слои литосферы и весь органический мир планеты (живое вещество) [23]. В настоящее время земной корой называют только верхнюю часть литосферы, и в прежнем широком понимании специальное название для нее отсутствует, хотя такая необходимость явно имеется [24]. Это ощущал и Н.Б. Вассоевич [25], который предложил наряду с биосферой (в понимании В.И. Вернадского) выделить мегабиосферу — земную оболочку, выходящую за пределы области существования живых организмов.

В одной из последних работ Н.Б. Вассоевича, написанной совместно с А.Н. Ивановым, мегабиосферой названа оболочка, «в которой присутствует (хотя бы в малом количестве) вещество, испытывавшее то или иное, прямое или косвенное влияние живого вещества и его отходов» [26, с. 299]. Здесь, как и при выделении биосферы, основным критерием служит отношение к живому веществу. Если пространство биосферы определяется присутствием живых организмов, то признаком мегабиосферы является наличие вещества, испытывавшего любое, сколь угодно малое, прямое или косвенное воздействие жизни. В то же время применение данного критерия не позволяет четко оконтурить пространство мегабиосферы, в частности провести ее нижнюю границу, поскольку тогда в ее состав пришлось бы включить и опустившиеся глубоко в мантию литосферные плиты, которые какое-то время отдельными своими частями находились в пространстве биосферы. Однако самое главное заключается в другом. Ни Н.Б. Вассоевич, ни другие авторы, обсуждая выделение мегабиосферы, не дали ответа на главный вопрос: каким образом присутствие даже малых количеств вещества, испытывавшего прямое или косвенное влияние жизни, может изменить свойства пространства, в котором оно находится, до такой степени, что возникает необходимость выделения особой геосферы?

Очевидно, если рассуждать о возможности выделения геосферы, более крупной, чем биосфера, и ее включающей, необходимо в первую очередь показать наличие функционального единства биосферы с определенной частью ее абиотического окружения и существование единого для них системообразующего процесса.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БИОСФЕРЫ С ЕЕ АБИОТИЧЕСКИМ ОКРУЖЕНИЕМ

Биосферу можно сравнить с очень сложно устроенным непрерывно действующим на протяжении более 3 млрд лет гигантским химическим реактором, в котором происходит непосредственное взаимодействие живого и косного вещества. Однако в любом химическом производстве одного только реактора для осуществления всего производственного процесса недостаточно: необходимы также линии подготовки и доставки реагентов, выделения и очистки полезных продуктов, утилизации отходов производства и т. д. Поэтому для существования биосферы необходимо еще такое устройство внешнего по отношению к ней пространства, которое обеспечивало бы бесперебойное функционирование этого планетарного реактора. Важнейшими рабочими функциями этого внешнего относительно биосферы пространства должны быть обеспечение поступления исходных реагентов, необходимых для поддержания жизни, и удаление отходов (биосферных метаболитов), накопление которых в биосфере, как и в любой другой экосистеме, негативно отражается на ее состоянии.

Химическое взаимодействие организмов с абиотической средой допустимо разделить на короткодействующую и дальнедействующую составляющие. К первой относится собственно физиологический процесс обмена веществ, в ходе которого организмы поглощают косное вещество, находящееся в непосредственной близости от них, и выделяют продукты метаболизма, активно преобразующие окружающую среду. Вместе с тем продукты метаболизма способны распространяться на большие расстояния и достигать мест, где живые организмы отсутствуют. Точно так же питательные вещества могут поступать в непосредственное окружение организмов из областей, где последние не обитают. В обоих случаях следует говорить об опосредованном взаимодействии живого и косного вещества, которое допускает возможность включения в экосистему обособленных элементов абиотической среды, имеющих существенное значение для функционирования экосистемы в целом.

С такой точки зрения биосфера, сложенная биокосным веществом, представляет собой элемент более обширной глобальной экосистемы — экосферы, для которой системообразующим процессом служит большой геологический круговорот, выполняющий за пределами биосферы важную биогеохимическую функцию — регенерацию выходящих из биосферы отработанных «биосферных метаболитов». Для доказательства этого положения рассмотрим некоторые факты.

Как известно, фотосинтез является тем главным процессом, который, преобразуя энергию электромагнитного излучения Солнца в химическую энергию термодинамически неравновесных продуктов реакции (органического вещества и свободного кислорода), лежит в основе существования всех форм жизни на Земле. Благодаря разной плотности продуктов фотосинтеза происходит их пространственное разделение в гравитационном поле Земли. В результате молекулярный кислород накапливается в атмосфере, а синтезированное органическое вещество концентрируется на поверхности и в самых верхних слоях твердых частей планеты — почв и донных отложений водоемов:



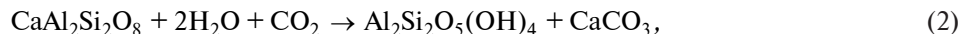
Пространственное разделение кислорода и органического вещества имеет принципиальное значение для устойчивости биосферы, поскольку тормозит протекание реакции (1) в обратном направлении, которое идет самопроизвольно с высокой скоростью благодаря каталитическому действию организмов-деструкторов.

Часто считают, что соотношение скоростей протекания реакции (1) в прямом и обратном направлениях, идущей с участием живых организмов, служит основным биогеохимическим механизмом регуляции состояния биосферы. Однако можно привести много примеров, свидетельствующих о не менее важной роли процессов, происходящих в ее абиотическом окружении.

К таким процессам можно отнести, например, седиментационный механизм разделения продуктов фотосинтеза. При высокой скорости осадконакопления органическое вещество быстро уходит вниз от границы вода–дно, где его окисление происходит с наибольшей интенсивностью. Следствием этого является захоронение значительной доли органического вещества, поступившего на дно из водной толщи. При низкой скорости осадконакопления основная масса органического вещества успевает окислиться, и захоранивается лишь небольшая его часть. В результате содержание органического вещества в осадках океанов и морей закономерно возрастает с увеличением скорости осадконакопления [27]. Максимальные значения скорости осадконакопления приурочены к областям и эпохам орогенеза, движущей силой которого служат глубинные геодинамические процессы, протекающие без сколько-нибудь заметного влияния биоты. Отсюда следует, что в пространственном раз-

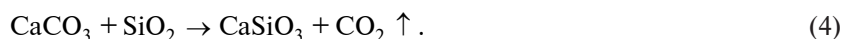
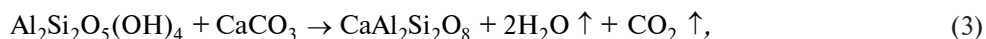
делении молекулярного кислорода и органического вещества, создающем термодинамическую редокс-неравновесность биосферы, глубинные внебиосферные процессы имеют первостепенное значение.

Другой пример важной роли процессов, идущих за пределами биосферы, относится к механизму гомеостаза содержания CO_2 в атмосфере. Помимо образования органического вещества из CO_2 в биосфере, в ходе выветривания происходит связывание CO_2 в форме карбонатных минералов:

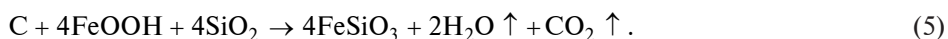


которые вместе с другими продуктами выветривания переносятся в океан и выводятся из пространства биосферы, образуя осадочные породы. Согласно имеющимся оценкам, в результате связывания CO_2 при выветривании горных пород его полное исчезновение из атмосферы могло бы произойти в течение нескольких десятков тысяч, может быть сотен тысяч, лет — мгновение в геологической истории [28]. При термодинамических параметрах современной биосферы CaCO_3 устойчив, и то, что снижения содержания CO_2 не происходит, указывает на наличие процессов в абиотическом окружении биосферы, которые служат для нее источником CO_2 .

В геохимии такие процессы, протекающие при повышенных температурах в зоне развития метаморфических процессов, хорошо известны под названием реакций декарбонатизации (стрелки, направленные вверх, означают возврат CO_2 и H_2O в составе метаморфогенных флюидов из зоны метаморфизма в расположенную выше биосферу):



К этим реакциям следует присоединить окисление органического вещества осадочных пород оксидами Fe (III) и Mn (IV), также происходящее с высокой скоростью при повышенных температурах, например:

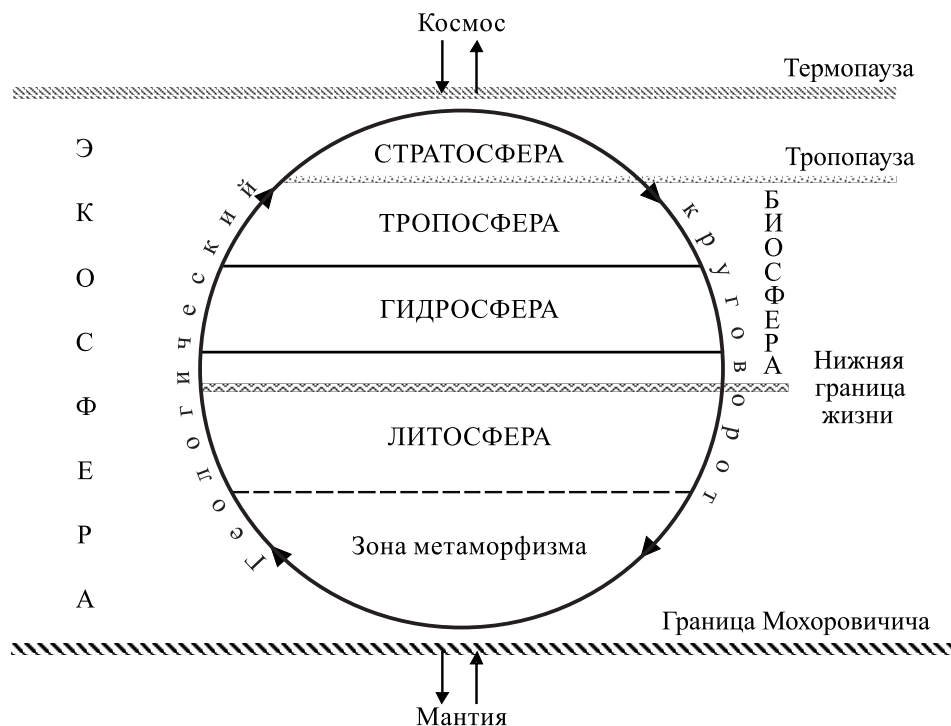


Все указанные реакции, возвращающие в биосферу CO_2 и H_2O в доступной для усвоения организмами форме, осуществляются за пределами биосферы, встроены в большой геологический круговорот и являются необходимым условием существования жизни на Земле.

О масштабах регенерации CO_2 можно судить по изменению содержания различных форм углерода в осадочных и производных от них метаморфических породах. При использовании разных методов расчета величина общего возвратного потока углерода в составе метаморфогенных флюидов составляет 0,16–0,28 млрд т С/год [7, 21]. Эта оценка примерно соответствует количеству углерода, выводимого из биосферы в составе донных отложений морей и океанов [27].

Итак, процессы метаморфизма, происходящие за пределами биосферы, служат тем механизмом организации экосферы, который обеспечивает существование жизни на Земле в течение длительного времени. Нижняя граница экосферы должна проводиться по зоне метаморфизма включительно, где геологический круговорот вещества достигает максимальных значений температуры и давления.

В первой половине XX в. широкое распространение имели представления о химической инертности глубинного вещества Земли (мантии и ядра) [29], которое не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на процессы, протекающие в земной коре. Этой точки зрения придерживался и В.И. Вернадский, связывавший геологические процессы исключительно с земной корой и считавший, что «процессы в ней начинаются и в ней заканчиваются» [30, с. 72]. Последующие исследования коренным образом изменили эти представления [31–36]. Сейчас имеются все основания считать, что в мантии — от ее верхних слоев до границы с ядром — протекают химические процессы, участвующие в формировании глобальной, вероятно, многоярусной мантийной конвекции. Эта конвекция материально и энергетически связывает мантию с земной корой: восходящие течения доходят до литосферы, воздействуя на нее термически и поставляя легкоплавкие и летучие вещества глубинного происхождения, тогда как нисходящие течения увлекают в глубь Земли отдельные фрагменты литосферы. Мантийная конвекция также приводит в движение континентальные и океанические литосферные плиты, перемещение которых составляет неотъемлемую часть геологического круговорота вещества. Таким образом, автократия земной коры и автономность геологического круговорота вещества, о которых писал В.И. Вернадский, в действительности имеют относительный характер, обусловленный многоярусной структурой конвекции в системе кора–мантия.



Положение экосферы в структуре планеты и ее взаимоотношение с биосферой.

Стелками обозначены потоки энергомассообмена.

Сложнее определить положение верхней границы экосферы. Несомненно, озоновый экран, находящийся в атмосфере за пределами биосферы, — необходимый элемент устройства экосферы. Он задерживает жесткое ультрафиолетовое излучение Солнца и обеспечивает возможность существования организмов в атмосфере и на поверхности суши и моря. Однако если считать, что для экосферы системообразующим процессом является геологический круговорот вещества, то верхнюю границу следует проводить по мезопаузе, расположенной на высоте 100 км.

Одинаковый состав газов атмосферы до высоты около 100 км (до начала термосферы) указывает на то, что вся нижележащая область находится в динамическом равновесии и перемешана. Выше мезопаузы, на высотах более 100 км, значимость процессов динамического перемешивания резко снижается, проявлением чего становится дифференциация газов по молекулярной (атомной) массе в поле тяготения Земли. Поскольку обязательным условием циклического перемещения вещества является наличие динамической связи между всеми его звеньями, область действия большого геологического цикла можно распространить вверх до границы термосферы.

Большой геологический круговорот как планетарный динамический процесс связывает биосферу и ее ближайшее окружение в единую геосистему геосферного ранга — экосферу (см. рисунок), придавая ей специфическую форму структурно-функциональной организации или, другими словами, особую форму пространственно-временного сопряжения процессов, в ней протекающих.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ПРОСТРАНСТВА ЭКОСФЕРЫ

Н.Б. Вассоевич, относя к мегабиосфере (экосфере в нашем определении) все земное пространство, испытывавшее хотя бы в малой степени воздействие живых организмов, не указал критерии, по которым это воздействие можно было бы установить за пределами собственно биосферы — области существования живых организмов. Одним из таких критериев может стать редокс-неравновесность.

Любые современные проявления жизни так или иначе связаны с основной реакцией (1), которая создает химическую редокс-неравновесность биосферы и ее окружения. Молекулярный кислород окисляет не только биогенное органическое вещество, но и многие другие минеральные компоненты, образуя в конечном счете целый ряд промежуточных соединений-окислителей меньшей силы: FeOOH , MnO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2 и др. Точно так же органическое вещество производит промежуточные соеди-

нения-восстановители: H_2S , Fe^{2+} , Mn^{2+} и др. Влияние жизни всегда проявляется в совместном присутствии хотя бы некоторых окислителей и восстановителей биогенного происхождения.

Редокс-неравновесность служит «визитной карточкой» жизни: там, где влияние жизни прекращается, исчезает и редокс-неравновесность [37]. Особенно отчетливо это видно при высоких температурах в зоне метаморфизма, которую, по-видимому, можно назвать нижней границей экосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, самой большой экосистемой Земли следует считать не биосферу, как это обычно делают, а совокупность всех внешних геосфер, включая атмосферу до нижней границы термосферы, всю гидросферу и литосферу до метаморфической оболочки включительно. Эту систему мы предлагаем называть экосферой, поскольку в ней совершается полный цикл жизни: от образования живых организмов из минеральных компонентов до полного превращения в исходные минеральные составляющие всего живого вещества и всех продуктов биосферного метаболизма — веществ, образованных в биосфере при прямом или косвенном участии живых организмов. За пределами экосферы нет ни живых организмов, ни продуктов их жизнедеятельности, сохранивших приобретенную в биосфере термодинамическую неравновесность.

Экосфера представляет для всего живого «дом», в котором есть жилыцы, жилые помещения и даже системы автономного жизнеобеспечения. Системообразующим процессом для экосферы является большой геологический круговорот вещества, охватывающий атмосферу (до термосферы), гидросферу и литосферу по крайней мере до метаморфической оболочки включительно. Процессы метаморфизма осуществляют регенерацию продуктов биосферного метаболизма и обеспечивают их возврат в биосферу в формах, доступных для повторного потребления живыми организмами.

Понятие «экосфера» в нашей формулировке позволяет, во-первых, использовать термин «земная кора» только в его современном понимании. Во-вторых, оно исключает близкое по охвату пространства, но не имеющее точного определения понятие «мегабиосфера». Наконец, в-третьих, способствует восстановлению, хотя и в новом смысле и под новым названием, географической оболочки в тех границах, которые проводил А.А. Григорьев [2, 3] первоначально, но которые впоследствии были неоправданно сужены. При этом изучение экосферы в качестве единой геосистемы геосферного ранга может содействовать реальной интеграции географических и геологических наук в области всестороннего изучения природы Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Личков Б.Л. О значении теории Земли и о необходимости ее создания // Геогр. сборник. — 1962. — Вып. 15. — С. 7–28.
2. Григорьев А.А. Предмет и задачи физической географии // На методологическом фронте географии и экономической географии. — М.; Л.: Соцэкгиз, 1932. — С. 45–59.
3. Григорьев А.А. Некоторые итоги разработки новых идей в физической географии // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. — 1946. — Т. 10, № 2. — С. 139–167.
4. Tansley A.G. The use and abuse of vegetational concepts and terms // Ecology. — 1935. — Vol. 16, N 3. — P. 284–307.
5. Реймерс Н.Ф. Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы. — М.: Россия молодая, 1994. — 367 с.
6. Шилов И.А. Экология. — М.: Высш. шк., 2000. — 512 с.
7. Савенко В.С. Что такое жизнь? Геохимический подход к проблеме. — М.: ГЕОС, 2004. — 203 с.
8. Cole L.C. The ecosphere // Scientific Amer. — 1958. — Vol. 198, N 4. — P. 83–96.
9. Акимова Т.А., Хаскин В.В. Экология. — М.: ЮНИТИ, 1998. — 455 с.
10. Дедю И.И. Экологический энциклопедический словарь. — Кишинев: Гл. ред. Молд. сов. энциклопедии, 1990. — 408 с.
11. Снакин В.В. Экология и охрана природы: Словарь-справочник. — М.: Academia, 2000. — 384 с.
12. Odum E.P. Fundamentals of ecology. Third edition. — Philadelphia: W.B. Saunders Company, 1971. — 574 p.
13. Макунина Г.С. Экосфера и ландшафтная оболочка // География и природ. ресурсы. — 2003. — № 2. — С. 20–25.
14. Круть И.В. Введение в общую теорию Земли. — М.: Мысль, 1978. — 367 с.
15. Розанов Б.Г. Основы учения об окружающей среде. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. — 372 с.
16. Высоцкий Б.П. Проблемы истории и методологии геологических наук. — М.: Недра, 1977. — 280 с.
17. Голубев Г.Н. Геоэкология. — М.: ГЕОС, 1999. — 338 с.

18. **Вернадский В.И.** Несколько слов о ноосфере // Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. — М.: Наука, 1987. — С. 298–305.
19. **Иванов А.В.** Концептуальные подходы к выявлению структурно-функциональной организации биосферы // Биосфера и ноосферный путь ее развития. — Хабаровск: Дальнаука, 1999. — С. 9–61.
20. **Вернадский В.И.** Биосфера // Избранные сочинения. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — Т. 5. — С. 5–102.
21. **Савенко В.С.** Геохимические аспекты устойчивого развития. — М.: ГЕОС, 2003. — 180 с.
22. **Соколов Б.С.** Вернадский и XX век // Очерки о науке и ученых. — М.: Наука, 2000. — С. 130–136.
23. **Вернадский В.И.** Очерки геохимии // Избранные сочинения. — М.: Изд-во АН СССР, 1954. — Т. 1. — С. 5–392.
24. **Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А.** Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. — М.: Наука, 1990. — 181 с.
25. **Вассоевич Н.Б.** Различное толкование понятия биосфера // Исследования органического вещества современных и ископаемых осадков. — М.: Наука, 1976. — С. 381–399.
26. **Вассоевич Н.Б., Иванов А.Н.** О биосфере и мегабиосфере // Журн. общей биологии. — 1983. — Т. 64, № 3. — С. 291–303.
27. **Романкевич Е.А.** Геохимия органического вещества в океане. — М.: Наука, 1977. — 256 с.
28. **Савенко В.С.** Трансформация силикатов в процессе литогенеза как фактор, контролирующий содержание CO_2 в атмосфере // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. — 2005. — № 5. — С. 5–11.
29. **Капустинский А.Ф.** Геосферы и химические свойства атомов // Геохимия. — 1956. — № 1. — С. 53–61.
30. **Вернадский В.И.** Очерки геохимии // Избранные сочинения. — М.: Изд-во АН СССР, 1954. — Т. 1. — С. 5–392.
31. **Добрецов Н.Л.** Основы тектоники и геодинамики. — Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2011. — 492 с.
32. **Morgan W.J.** Convection plumes in the lower mantle // Nature. — 1971. — Vol. 230, N 5288. — P. 42–43.
33. **Turcotte D.L.** Geochemical light on mantle convection // Nature. — 1982. — Vol. 296, N 5857. — P. 487–488.
34. **Bercovici D.** The generation of plate tectonics from mantle convection // Earth and Planetary Science Letters. — 2003. — Vol. 205, N 3–4. — P. 107–121.
35. **Korenaga J.** Plate tectonics, flood basalt and evolution of earth's oceans // Terra Nova. — 2008. — Vol. 20, N 6. — P. 419–439.
36. **Horodyskyj U., Lee C.-T., Luffi P.** Geochemical evidence for exhumation of eclogite via serpentinite channels in ocean–continent subduction zones // Geosphere. — 2009. — Vol. 5, N 5. — P. 426–438.
37. **Савенко В.С.** Редокс-системы внешних геосфер Земли и их роль в энергетике биосферы // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2005. — № 2. — С. 58–67.

Поступила в редакцию 18.06.2021

После доработки 22.02.2022

Принята к публикации 01.11.2022