РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РОССИЙСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ
ИМ. П.П.ШИРШОВА РАН

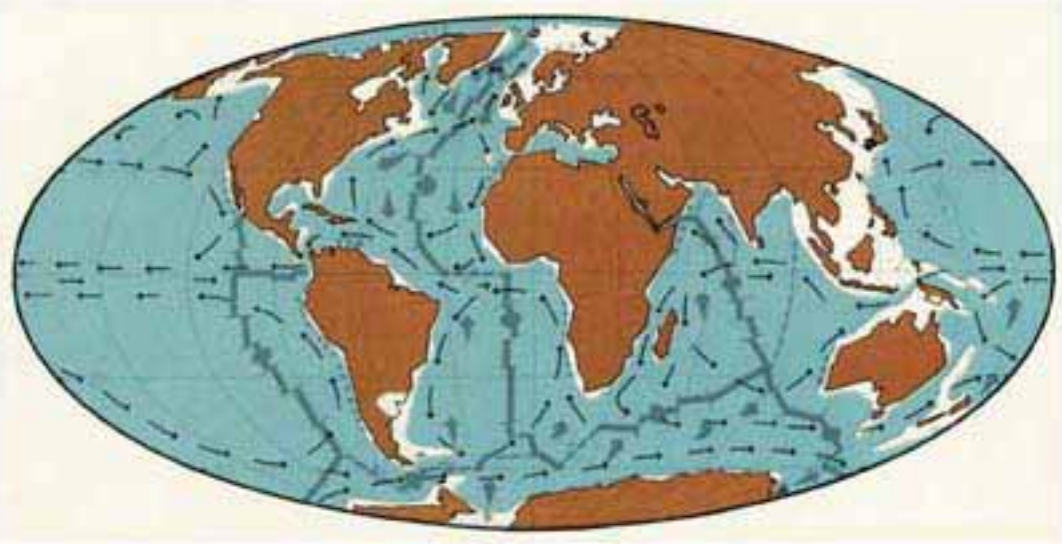
Материалы
XXI
Международной
научной
конференции
(Школы)
по морской
геологии

Москва

2015

ГЕОЛОГИЯ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Том IV



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА РАН

ГЕОЛОГИЯ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии

Москва, 16–20 ноября 2015 г.

Том IV

GEOLOGY OF SEAS AND OCEANS

Proceedings of XXI International Conference on Marine Geology

Moscow, November 16–20, 2015

Volume IV

Москва / Moscow
ГЕОС / GEOS
2015

ББК 26.221
Г35
УДК 551.35

Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. – М.: ГЕОС, 2015. – 376 с.

В настоящем издании представлены доклады морских геологов, геофизиков, геохимиков и других специалистов на XXI Международной научной конференции (Школе) по морской геологии, опубликованные в пяти томах.

В томе IV рассмотрены проблемы, связанные с биогеохимическими процессами в морях и океанах, геоэкологией, загрязнением Мирового океана, новыми методами четырехмерного мониторинга, а также проблемы морской геологии Арктики и Антарктики.

Материалы опубликованы при финансовой поддержке Отделения наук о Земле РАН, Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 15-05-20419), издательства ГЕОС.

Ответственный редактор
Академик *А.П. Лисицын*
Редакторы к.г.-м.н. *Н.В. Политова*, к.г.-м.н. *В.П. Шевченко*

Geology of seas and oceans: Proceedings of XXI International Conference on Marine Geology. Vol. IV. – Moscow: GEOS, 2015. – 376 p.

The reports of marine geologists, geophysics, geochemists and other specialists of marine science at XXI International Conference on Marine Geology in Moscow are published in five volumes.

Volume IV includes reports devoted to the problems of biogeochemical processes in the seas and oceans, geoecology, pollution of the World Ocean and new methods of four-dimensional monitoring and problems of marine geology of Arctic and Antarctic regions.

Chief Editor
Academician *A.P. Lisitzin*
Editors Dr. *N.V. Politova*, Dr. *V.P. Shevchenko*

ISBN 978-5-89118-640-8
ББК 26.221
© ИО РАН 2015

Савенко В.С.
(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru)

Геологические факторы формирования и эволюции термодинамической неравновесности биосферы

Savenko V.S.
(M.V.Lomonosov Moscow State University)

Geological factors of formation and evolution of biosphere thermodynamic nonequilibrium

Ключевые слова: биосфера, термодинамическая неравновесность, пространственное разделение продуктов фотосинтеза, эволюция химического состава осадочных пород

Живые организмы и биокосные системы Земли всех уровней, от отдельных биогеоценозов до биосферы в целом, объединяет то, что они существуют, только находясь в состоянии сильной термодинамической неравновесности. Степень термодинамической неравновесности систем количественно характеризуется величиной избыточной свободной энергии (G^{ex}), которая равна разности свободных энергий текущего (G) и равновесного (G^{eq}) состояний:

$$G^{ex} = G - G^{eq}. \qquad (1)$$

Чем больше величина избыточной свободной энергии, тем больше приближена система к области существования “диссипативных структур”, одним из проявлений которых является жизнь.

В живых организмах избыточная свободная энергия запасается и хранится в так называемых биохимических аккумуляторах, к которым относятся, например, актин-миозиновый комплекс сократительных мышц или мембранная разность электрохимических потенциалов. Подобно живым организмам, в биосфере также происходит накопление избыточной свободной энергии, которое обусловлено процессом фотосинтеза

$$CO_2 + H_2O = CH_2O + O_2. \qquad (2)$$

В качестве геохимических аккумуляторов в этом случае выступают термодинамически неравновесные продукты фотосинтеза: органическое вещество и молекулярный кислород вместе с производными от него другими биогенными окислителями (сульфатами, оксигидроксидами трехвалентного железа, диоксидом марганца, нитратами и т.п.). Благодаря сильным различиям в плотности, органическое вещество и молекулярный кислород про-

странственно разделяются: кислород накапливается в атмосфере, тогда как синтезированное органическое вещество концентрируется на поверхности и в самых верхних слоях литосферы – почвах и донных отложениях океанов, морей и континентальных водоемов. В соответствии с этим распределением происходит вертикальная стратификация биосферы по окислительно-восстановительному состоянию. Верхняя область, называемая оксисферой, характеризуется избытком окислителей и объединяет атмосферу, поверхностные воды гидросферы, исключая анаэробные бассейны типа Черного моря, и зону аэрации на суше. Под оксисферой располагается восстановительная зона биосферы – редусфера.

Большая величина энергии активации для реакции окисления органического вещества не может быть причиной сохранения кислорода в атмосфере, поскольку организмы выработали высокоэффективные катализаторы, с помощью которых достигается высокая скорость процессов деструкции. Полному исчезновению кислорода из атмосферы препятствует описанное выше пространственное разделение продуктов реакции (2). Но 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 серу, оксигидроксиды трехвалентного железа, диоксид марганца), но без участия живых организмов процессы окисления идут чрезвычайно медленно, и поэтому концентрации компонентов главных редокс систем в осадочных породах отражают синхронное с их образованием редокс состояние биосферы.

А.Б. Ронов на огромном фактическом материале показал, что с течением времени на фоне общего роста концентрации органического углерода (восстановителя) наблюдается синхронное увеличение содержания окисленных компонентов главных редокс систем: окисного–закисного железа и сульфатной–сульфидной серы (рис.). Эту тенденцию нельзя связать с процессами приближения вещества осадочных пород к равновесию, происходящими за пределами биосферы. Действительно, содержание органического углерода в осадочных породах неуклонно повышалось от 0.26% в верхнем протерозое до 0.81% в кайнозое [1]. Предположим, что меньшее содержание органического вещества в древних породах обусловлено большей длительностью процесса перехода к состоянию термодинамического равновесия. Тогда различие содержания органического углерода в древних и молодых породах можно было бы связать с его расходованием на восстановление окисленных форм железа и серы. Наблюдаемой разности концентраций органического углерода хватило бы для полного превращения 3% железа (III) в железо (II) и образования 0.5% сульфидной серы, содержание ко-

торой в осадочных породах верхнего протерозоя, равно как и в осадочных породах другого возраста, существенно ниже этой величины. Но самое главное противоречие заключается в том, что концентрация сульфидной серы в ходе геологического времени увеличивается, а не уменьшается, как должно быть при протекании реакции

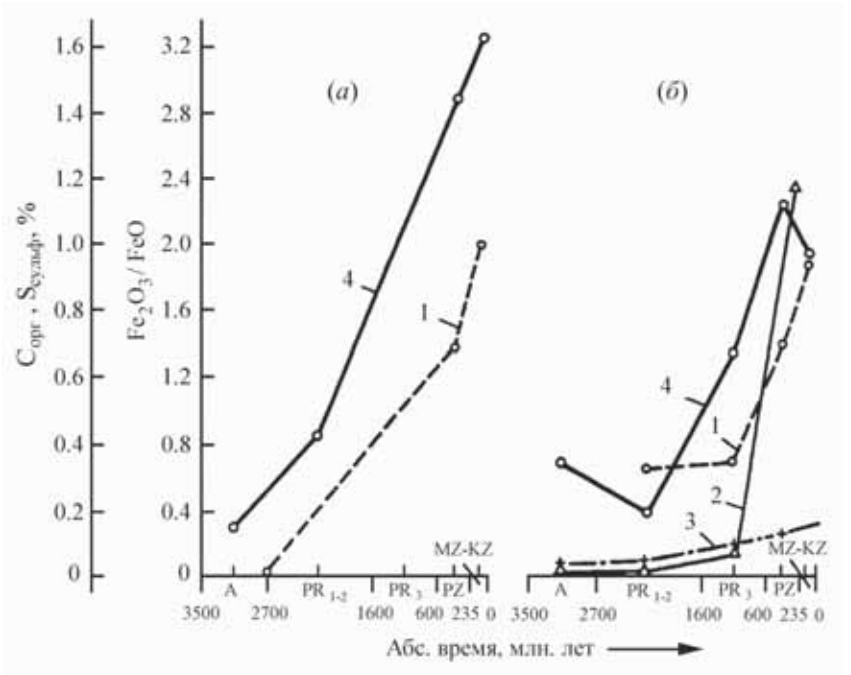


Рисунок. Эволюция содержания органического углерода (1), сульфатной (2) и сульфидной (3) серы, а также величины отношения окисного железа к закисному (4) в осадочных породах Северо-Американской (*а*) и Русской (*б*) платформ [1].

$$SO_4^{2-} + 2C_{орг} = S^{2-} + 2CO_2. \qquad (3)$$

Таким образом, данные по химической эволюции осадочной оболочки Земли показывают, что вещество, выходящее из биосферы и дающее начало осадочным породам, с течением времени становилось все более неравновесным. Отсюда можно сделать вывод, что эволюция биосферы шла в направлении увеличения ее внутренней неравновесности. Причиной этого явления, имеющего фундаментальное значение для понимания эволюции жизни на Земле, служит усиление со временем степени дифференциации

рельефа [2] и связанное с ним увеличение скоростей осадконакопления, приводящее к более эффективному разделению продуктов фотосинтеза – молекулярного кислорода и органического вещества.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14–05–00624).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ронов А.Б. Осадочная оболочка Земли. М.: Наука, 1980. 79 с.
2. Савенко В.С. О вероятных причинах увеличения высот горных систем в течение геологического времени // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1969. № 3. С. 110–112.

Data on evolution of the chemical composition of sedimentary rocks evidenced about increase of biosphere thermodynamic nonequilibrium in length of time. The reason for occurrence of strong biosphere thermodynamic nonequilibrium is spatial separation of photosynthesis products (accumulation of molecular oxygen in the atmosphere and organic matter in bottom sediments of the World ocean and continental reservoirs). Deposition of organic matter in the bottom sediments represents the geological mechanism of formation of biosphere thermodynamic nonequilibrium. Growth of the biosphere nonequilibrium is caused by increase of sediment accumulation rate during geological time.