

УДК 551.2; 551.14; 553.98

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ И БИОСФЕРА КАК СИСТЕМНЫЕ ФАКТОРЫ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

© 2017 г. И.Ф. Савченко¹, Н.И. Белозеров², И.В. Гиренко¹

¹ Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия

² Амурский научный центр ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия

Предложена и подтверждена расчетами концепция роли биосферы в эволюции Земли. Согласно концепции, в добиосферный период сформировалась оболочечная структура, глобальная конвекция осуществлялась в виде тектоники малых плит, отсутствие материков исключало участие воды в окислении магматических пород. В биосферный период фотосинтетические организмы стали поставлять в среду обитания свободный кислород и органические вещества (ОВ). Кислород стал принимать участие в геохимических процессах преобразования руд, формировании азотно-кислородного состава атмосферы, генерации гранитоидов из эффузивов магмы. Впервые выделены глобальные системы генерации гранитоидов континентальной коры и углеводородов (УВ), которые формируются при субдукционно-коллизии поглощении океанской коры. На пути транзита в зону Беньюфа из обогащенных кислородом продуктов гальмиролиза выплавляются граниты, а термический метаморфизм ОВ дает твердые аллотропные соединения углерода, нефть, горючие и другие газы и сопровождается выделением энергии разложения ОВ. Это один из путей конверсии биосферной солнечной энергии в эндодинамические процессы эволюции Земли. В среднем ежегодно в океанические осадки выпадает 785.5 Мт первичных ОВ, генерируется 1.7 км³ континентальной коры. За биосферный период Мировой океан обмелел на 904.5 млн км². Геодинамические и геофизические процессы, прежде всего глобальная конвекция, действуя совместно с биосферными факторами, сформировали современное состояние оболочек Земли и обусловили существование в них систем генерации УВ и континентальной коры.

Ключевые слова: геосферы, конвекция, гальмиролиз, фотосинтез, биосфера, геофизические процессы, эволюция.

PACS 92.90+X

Введение

Развитие Земли обусловлено в большей мере физико-химическими превращениями в недрах, которые выявляются при изучении геодинамических процессов [Добрецов, 2010]. Геохимическая модель может быть построена только с учетом тепломассообмена.

Образование гранитоидов путем биохимического выветривания базальтов океанической коры обосновывает Г.А. Заварзин [2001]; на сиалическом гранитообразовании настаивает В.Е. Хаин [2007, 2010]. Континентальная кора и живые организмы появились на Земле в интервале 3.8–3.5 млрд лет [Хаин, 2007, 2010]; к этому же периоду относится начало железорудного цикла. Г.А. Заварзин [2001] связывает его появление с развитием древнейших автотрофов, сине-зеленых и других низших водорослей, образованием строматолитов.

Земля представляет собой систему оболочек (геосфер), каждая из которых имеет свой химический состав, фазовое состояние, внутреннюю динамику. Геосферы взаимодействуют между собой, проникая друг в друга [Пуцаровский Ю.М., Пуцаровский Д.Ю., 1999]. Механизмом взаимодействия геосфер и обмена веществом и энергией является глобальная конвекция, которая может с течением времени менять интенсивность [Хаин, Гончаров, 2006; Добрецов, 2010а, б; Хаин, 2010]. Имеющиеся подходы к разработке моделей геодинамической эволюции Земли не показывают в полной мере пути и способы изменения химического состава геосфер, механизм конвергенции вещества и энергии между геосферами, роль и значение биосферы в общей эволюции Земли. В работе, посвященной научной деятельности В.И. Вернадского, А.В. Лапо предпочел отделить производящую живую часть биосферы от ее геодинамического прошлого и биогеохимического настоящего [Лапо, 1987].

Эволюция геосфер может быть уточнена с привлечением к объяснению их динамики системных факторов, к которым относятся геодинамика, геофизические и геохимические процессы, солнечная энергия и биосфера. Мы попытаемся выявить и проанализировать причинно-следственные связи между эволюцией оболочек Земли и ведущими системными факторами развития. Особое внимание будет уделено усвояемой солнечной энергии и веществам, участвующим в фотосинтезе или являющимися его продуктами. Это вещества, которые, согласно [Вернадский, 1960], можно назвать компонентами биосферы. К ним относятся H_2O , CO_2 , органическое вещество (ОВ) и O_2 , их динамика зависит от интенсивности фотосинтеза и количества усвоенной растениями солнечной энергии.

Использованные данные и методы исследования

В статье использованы справочные сведения об атмосфере, гидросфере, литосфере, континентальной коре из работ [Геологический..., 1973; Миловский, 1973; Полевой, 1989; Физические..., 1991; и др.].

Согласно модели геодинамической эволюции Земли [Хаин, 2007, 2010; Добрецов, 2010а, б], на ранней стадии ее развития преобладала полномантийная конвекция, которая просуществовала до рубежа 2.7–2.6 млрд л.н. Она могла быть ячеистой [Алексеев, 2012] или валиковой [Жарков, 1983], но полномантийной [Добрецов, 2010а, б]. Затем стала проявляться конвекция в виде тектоники литосферных плит, но реликты крупноячеистой конвекции просуществовали до рубежа 2.0–1.8 млрд л.н. [Хачатрян, 2013; Барышев, Хачатрян, 2015]. В интервале 3.8–3.5 млрд л.н. на Земле появились автотрофы [Заварзин, 2001; Розанов, 2010].

Автотрофы, осуществляющие свою жизнедеятельность путем фотосинтеза, используя для этого воду и углекислый газ из гидросферы и атмосферы и солнечную энергию, вносят в общий тепломассоперенос новые вещества – свободный кислород (O_2), органическое вещество (ОВ) и конвертированную в них солнечную энергию. В соот-

ветствии с изложенным в эволюции Земли, согласно одной из теорий, выделяют добиосферный и биосферный периоды, а также предбиосферный интервал.

Значение конвекции в добиосферный период следует рассматривать в неразрывной связи с выветриванием излившихся пород, формированием осадков, превращением их в осадочные породы, и вовлечение затем этих пород в систему конвективного теплообмена, термобарический метаморфизм с образованием новых минералов и пород.

Мировой океан и первичная атмосфера сформировались в интервале 4.55–4.40 млрд л.н. [Хаин, 2007, 2010]. Атмосфера, гидросфера, литосфера и мантия участвовали в глобальной конвекции в течение 0.9 млрд лет добиосферного периода. Геологические свидетельства окисления литосферы в добиологический период отсутствуют; состав мантийного вещества был относительно однородным. Можно предположить, что мантийное вещество при полноантийной конвекции выполняло роль теплоносителя, а верхнемантийные и нижнемантийные резервуары геохимически обособились лишь в раннем карелии (2.0–1.8 млрд л.н.), т.е. уже в биосферный период.

С учетом того, что «расходными материалами» фотосинтеза – основного процесса в биосфере – являются H_2O , CO_2 и солнечная энергия, сведения о предбиологическом состоянии атмосферы и гидросферы необходимы для оценки их участия в эволюции геосфер, конверсии веществ и энергии. Мы обращаем внимание на отсутствие убедительных геологических доказательств образования коры континентального типа в добиосферный период и на использование фотосинтетического кислорода для увеличения доли кремнекислоты в породах континентальной коры в биосферный период.

Модель эволюции геосфер в добиосферный период

Содержащиеся в работах [Хаин, 2007; Добрецов, 2008, 2010а, б] геологические данные о состоянии магматического океана, мантии, составе пород в добиосферный период дают представление о существовании глобальных процессов эволюции оболочек до появления автотрофных организмов. Добиосферный период начинается главной аккрецией планетоземалей и охватывает интервал 4.55–3.5 млрд л.н. (1050 млн лет).

Главные события в этот период следующие: 4.55–4.40 млрд л.н. – формирование Мирового океана и первичной аммиачно-углекислой атмосферы [Дроздовская, Снежко, 1989]; конвекция в магматическом океане; начало формирования континентальной коры, представленной тоналит-трондьемитовыми гнейсами на рубеже 3.9 млрд л.н. и реликтами магматического океана мощностью до 1000 км [Жарков, 1983; Хаин, 2007, 2010; Шкодзинский, 2009; Добрецов, 2010б; Алексеев, 2012; Хачятрян, 2013; Барышев, Хачятрян, 2015]. Магматические интрузивные и эффузивные породы этого возраста имеют в основном ультраосновной и основной состав (содержание SiO_2 – менее 50 %).

При глубине конвекции 1000 км диаметр конвективной ячейки мог достигать 1400 км [Жарков, 1983; Алексеев, 2012], общая длина палеохребтов достигала 840 тыс. км при равной длине палеовпадин. Палеохребты и палеовпадины при коэффициенте расширения пород $L = 2 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ и градиенте температур 1000 К имели перепад высот около 2 км. В этих условиях эффузивы и интрузивы подвергались выветриванию в водной среде (гальмиролиз) и формировали слой осадков, которые в составе океанической коры вовлекались затем в конвекцию и подверглись метаморфизму. Подсчет возможного количества осадков гальмиролиза на ячейках дайвинга показывает, что при скорости накопления минеральных осадков в среднем 5 мм за 1000 лет [Геологический..., 1973] объем осадков в добиосферный период должен был равняться $1150 Пм^3$ или 16.8 % современной континентальной коры. Однако в базит-ультрабазитовых

породах возрастом 4.4–3.5 млрд лет признаков окисления нет, следовательно, влияние добиосферного океана и добиосферной атмосферы на физико-химические преобразования пород литосферы в добиосферный период были ничтожными.

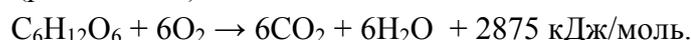
Фотосинтез и дыхание (окислительное разложение) – ведущие процессы в биосфере

Автотрофы, используя H_2O , CO_2 и солнечную энергию в планетарных масштабах, внесли в геофизические и геохимические процессы новое явление в виде фотосинтеза и новые вещества – кислород и органическое вещество.

Общее уравнение фотосинтеза:



Уравнение дыхания (разложения):



Из этих уравнений, а также из закона сохранения энергии следует, что при фотосинтезе с привлечением солнечной энергии должны были использоваться ресурсы H_2O гидросферы и CO_2 гидросферы и атмосферы. При невозможности полного окисления синтезированного органического вещества земные недра начали пополняться органическими осадками. В онтогенезе автотрофов и длительности существования их как организмов заложена основа органогенного седиментогенеза [Заварзин, 2001].

В гидросфере фотосинтетический кислород окисляет в первую очередь растворенные вещества, затем взвеси и илы. Кислород может сорбироваться из гидросферы силикатами, алюмосиликатами и другими породами, например цеолитами. Количество кислорода, затраченного в течении биосферного периода на геохимические процессы можно подсчитать по его содержанию в продуктах окисления, а по этой величине определить количество H_2O , CO_2 , OB , O_2 и солнечной энергии фотосинтеза, участвовавших в динамике геосфер.

Определение массы фотосинтетического кислорода, затраченного на окислительные процессы в биосферный период

Глобальных статей расхода фотосинтетического кислорода три: 1) формирование азотно-кислородной атмосферы; 2) образование железистых силикатов; 3) формирование континентальной коры.

Образование азотно-кислородной атмосферы объясняется окислением растворенного в океанской воде аммиака по реакции $4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O$. В атмосфере содержится 3.87 Пт N_2 и 1.19 Пт O_2 , на ее формирование первые водоросли выделили 7.82 Пт O_2 . Окисление 4.7 Пт NH_3 сопровождалось образованием 7.46 Пт воды.

Формирование железных руд, которых в литосфере содержится 661.0 Пт в виде Fe_2O_3 , происходило путем окисления гидроксидов железа (II) до оксида железа (III) по реакции $4Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 4H_2O$ с затратой 66.2 Пт фотосинтетического кислорода.

Затраты фотосинтетического кислорода на формирование континентальной коры объемом 68 550 Пм³ и массой 18 851 Пт сопровождалось поглощением 3310.9 Пт O_2 . Масса поглощенного кислорода рассчитывалась по избытку SiO_2 в континентальной

коре над содержанием SiO_2 в силе астеносферы, величина которого принята равной 32 мас. %, или 6216.5 Пт SiO_2 , в которых заключено 3310.9 Пт O_2 .

Всего за биосферный период на приведенные выше и поддающиеся учету цели было израсходовано 3384.9 Пт фотосинтетического кислорода. Он мог быть получен при фотосинтезе 3173.3 Пт первичных органических веществ, из которых формировались океанические осадки. Фотосинтез такого количества ОВ потребовал изъятия 1904.0 Пт H_2O из океана и 4654.2 Пт CO_2 из океана и атмосферы, а также усвоения $50.7 \cdot 10^{27}$ Дж солнечной энергии. Накопление этих ОВ в виде осадков сопровождалось окислением 4.7 Пт NH_4 в океане, эмиссией 3.87 Пт N_2 в атмосферу, образованием 7.46 Пт воды. Необходимо отметить, что до появления растений на суше в раннем доэоне фотосинтетический кислород производился только в океанах, следовательно, все океанические процессы осуществлялись с растворами $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и NH_3 или гидратированными веществами, т.е. с осадками гальмиролиза мог накапливаться сорбированный кислород.

Эволюция оболочек Земли в биосферный период, биохимия океана, атмосферы и конвекция

В биосферный период истории Земли происходили следующие события. На рубеже 3.8–3.5 млрд л.н. стали формироваться железистые кварциты, эпоха железорудного цикла закончилась к рубежу 1.7 млрд л.н., сменившись образованием красноцветных пород. Это связывают с появлением автотрофов, затем цианобактерий, строматолитов, древнейших протистов [Заварзин, 2001; Хаин, 2007, 2010].

За биосферный период было сформировано 2749.3 Пт океанических и 424.0 Пт континентальных органогенных осадков. Продукты же окисления распределились между атмосферой, гидросферой и литосферой (окисленные осадки гальмиролиза и формы $\text{Fe}(\text{III})$ в виде руд).

Формирование океанических осадков в биосферный период предполагает их органо-минеральный состав. Соотношение в осадках органики и минеральной части сильно варьирует, так как фотосинтез осуществляется в приповерхностной части Мирового океана, а гальмиролиз – в придонной. Океанические осадки вовлекались сначала в общемантийную конвекцию, которая на рубеже 2.0–1.8 млрд л.н. сменилась двуслойной тектоникой литосферных плит. При обоих типах конвективных процессов породы дайвинга подвергаются термобарическому метаморфизму. В отличие от осадков добиосферного периода, минеральные осадки биосферного периода содержат окисленные формы веществ и сорбированный кислород; это породы со значительным преобладанием кремнекислоты. Осадки ОВ, которые в добиосферных отложениях отсутствовали, подвергаются существенному метаморфизму. Основные вещества метаморфизма ОВ, мас. %: CO_2 – 36.7; H_2O – 30.0; углеводороды (УВ) – 25.7; аллотропные соединения углерода – 8.0. Состав этих продуктов метаморфизма соответствует заключению Д.И. Менделеева (1877 г. [Менделеев, 1949]) о равном распределении кислорода в твердых горючих ископаемых между углеродом и водородом. Можно отметить, что в условиях добиосферной конвекции магматические породы лишь выполняли роль теплоносителя при тепловой конвекции, в биосферный же период конвекция является средством энергомассообмена между геосферами (атмосферой, гидросферой, литосферой, астеносферой) и космическими источниками энергии (внутренним теплом Земли и солнечной энергией). Например, при метаморфизме ОВ в глубоких недрах в процессе эк-

зотермической реакции пиролиза выделяется ежегодно около $1.5 \cdot 10^{18}$ Дж энергии, что сравнимо с энергией землетрясений.

Биосферные факторы эволюции вносили в систему конвективного энергообмена определенные материальную и энергетическую составляющие. Это – изъятие из гидросферы 1904.0 Пт H_2O и 4032.3 Пт CO_2 , из атмосферы – 621.9 Пт CO_2 , эмиссия 7.8 Пт O_2 на формирование азотно-кислородной атмосферы; «вложение» 66.2 Пт O_2 в железистые силикаты и 3310.9 Пт O_2 в породы континентальной коры, а также 3173.3 Пт ОВ геологических осадков. В ОВ осадков было конвертировано $50.7 \cdot 10^{27}$ Дж солнечной энергии, из которых 12 % выделилось в виде энергии пиролиза при метаморфизме ОВ.

Существенные различаются также физико-химические свойства вновь синтезированных при конвекции биосферного периода и конвекции добиосферного периода веществ. Например, N_2 атмосферы менее растворим в воде по сравнению с NH_3 и CO_2 , выплавляемые из окисленных минеральных осадков породы содержат на 25–30 % больше SiO_2 , чем гипербазиты астеносферы. Эти новые эффузивы и интрузивы преобладают в континентальной коре, имея среднюю плотность на 15–20 % ниже плотности пород океанической литосферы. Обладая поэтому плавучестью, они исключаются из глобальной конвекции. Континенты – это плавающие над астеносферой платформы и острова, нарушающие кинематическую систему добиосферной полномантийной конвекции. Особенность термического метаморфизма ОВ при конвекции – выделение (дефлюидизация) парогазовых фракций, которые фильтруясь на пути к дневной поверхности, разделяются на конденсат и неконденсируемые газы. Твердая фаза метаморфизма ОВ, представленная аллотропными соединениями углерода, вовлекается в мантийные течения. Это углерод CO_2 , конвертированный фотосинтезом в состав ОВ и включенный в литосферу и астеносферу в результате конвекции и глубокого метаморфизма.

Изложенные выше результаты воздействия коллективных системных факторов на эволюцию геосфер за биосферный период позволяют, применив актуалистический подход, определить предбиосферное состояние внешних оболочек Земли. Например, по расходу воды на фотосинтез, возврату ее при метаморфизме ОВ и образованию при окислении аммиака объем предбиосферного Мирового океана определяется в 2283 Пм^3 . Поскольку существование континентов к началу архея геологически не доказано, средняя глубина предбиологического океана могла составлять 4476 м. Этим же способом можно вычислить средние скорости процессов, характеризующие динамику эволюции, и получить общее представление о состоянии геосфер в определенный геохронологический период. Результаты вычислений сведены в таблицу и на основе средних величин о динамике веществ пересчитаны для периодов стратиграфической шкалы 1993 г. [Жамойда, 2015].

Отличительным свойством конвекции в биосферный период является генерация плавающей на астеносфере континентальной коры и формирование значительных по площади, объему и массе ее фрагментов. Это привело к изменению кинематики общемантийной конвекции в интервале 2.0–1.8 млрд л.н., когда оформилась тектоника литосферных плит. Плюмы и суперплюмы появились несколько раньше (2.6–2.7 млрд л.н.). Образование плюмов объясняют субдукцией океанической коры под континент по всему его периметру и скучиванием холодного слэба на больших глубинах вплоть до поверхности ядра [Хаин, 2007, 2010; Иванов, 2006]. Образование континентов и суперконтинентов путем слияния террейнов подтверждают математические модели [Бобров, Баранов, 2014], согласно которым общемантийная скорость по всему объему равна 1.65 см/год, скорость на поверхности – около 5 см/год.

Участие компонентов биосферы в эволюции геосфер Земли

Компоненты биосферы, масса	Геологические периоды, млн лет*						Всего за биосферный период
	Архей (3500–2500)	Нижний протерозой (2500–1650)	Рифей (1650–650)	Венд (650–570)	Фанерозой (570–400)	Фанерозой (400 – по наст. время)	
Эмиссия фотосинтетического O ₂ для процессов окисления, Пт	857.6	727.4	816.7	65.4	138.8	779.0	3384.9
В том числе:							
на окисление атмосферы	7.8						7.8
на образование железных руд	33.1	33.1					66.2
на образование континентальной коры	816.7	694.3	816.7	65.4	138.8	779.0	3310.9
Осадконакопление ОВ, Пт	804.0	681.9	765.5	61.3	130.1	730.3	3173.3
В том числе:							
в океанах	804	681.9	765.7	61.3	130.1	306.3	2749.3
на суше						424.0	424.0
Изъятие воды из гидросферы на фотосинтез ОВ осадков, Пт	482.4	409.2	459.4	36.8	78.1	438.2	1904.0
Изъятие CO ₂ на фотосинтез ОВ осадков, Пт	1179.2	1000.1	1123.0	90.0	190.8	1071.1	4654.2
В том числе:							
из океанов	1179.2	1000.1	1123.0	90.0	190.8	449.2	4032.3
из атмосферы						621.9	621.9
Поглощение солнечной энергии на фотосинтез ОВ осадков, 10 ²⁷ Дж	12.5	10.7	12.5	1.0	2.2	11.8	50.7
Продукты метаморфизма ОВ океанических осадков							
Масса ОВ осадков океанов, Пт	804.0	681.9	765.7	61.3	130.1	306.3	2749.3
В том числе:							
масса CO ₂ (36.7 мас. %)	295.1	250.3	281.0	22.5	47.8	112.4	1009.1
масса воды пиролиза (30.0 мас. %)	241.2	204.6	229.7	18.4	39.0	91.9	824.8
масса общих углеводородов (25.3 мас. %)	203.4	172.5	193.7	15.5	32.9	77.5	695.5
масса аллотропных соединений С _{орг} (графит, графен, фуллерены, алмаз) (8.0 мас. %)	64.3	54.5	61.3	4.9	10.4	24.5	219.9
Динамика объемов океанов, Пм ³	2043.8	1834.9	1611.2	1555.3	1593.3	1338.5	–
Энергия экзогенной реакции термического метаморфизма, л · 10 ²⁷ Дж	1.5	1.3	1.5	0.1	0.3	1.4	6.1
Динамика континентальной коры, Пм ³	1690.9	3128.4	4819.2	4954.7	5242.0	6855.0	6855
Наращение коры, %	24.7	45.5	70.3	72.3	76.5	100	100

*Согласно Общей стратиграфической шкале 1993 г.

** Объем в предбиологический период был равен 2283 Пм³.

Холодный слэб, скученный на границе ядра с мантией, со временем нагревается, его вертикальные перегретые потоки дают начало плюму, горячим точкам, приводят к расколу суперконтинентов, образованию системы рифтов [Хаин, 2003, 2007, 2010], а также могут быть причиной эндогенной цикличности с периодом, кратным 30 и 120 млн лет [Добрецов, 1994, 2008]. Веществом плюмов являются породы глубокого термального метаморфизма океанической коры с твердой фазой углерода метаморфизма ОВ. Термические условия мантии не противоречат возможности генерации алмазов из твердой фазы метаморфизма ОВ. Биосферная природа углерода алмазов подтверждена наличием в их составе биогенных спутников [Хачатрян, 2013; Барышев, Хачатрян, 2015].

Постоянство процессов конвекции обусловлено остыванием Земли после главной аккреции планетоземалей и продолжающейся генерацией тепла из радиоактивных источников [Жарков, 1983]. ОВ океанических осадков стало принимать участие в глобальной конвекции с рубежа 3.5 млрд л.н. С этого момента результатом конвекции становится образование пород континентальной коры и продуктов метаморфизма ОВ океанических осадков. В архее (3.5–2.5 млрд л.н.) было сформировано 24.7 % объема континентальной коры, чего, по-видимому, было недостаточно для изменения кинематики конвекции. Изменение характера конвекции фиксируется появлением тектоники литосферных плит на рубеже 2.0–1.8 млрд л.н. [Жарков, 1983; Зоненшайн, Кузьмин, 1993; Добрецов, Кирдяшкин, 1995; Котелкин, Лобковский, 2008]. К этому времени (нижний протерозой) объем континентальной коры достиг 3128.5 Пм^3 и составил 45.5 % современного объема (см. таблицу); формируются суперконтиненты. Найти в составе современных континентов сохранившиеся остатки геологических структур, сформированных в архее в результате общемантийной конвекции, проблематично. Есть указания на кратонизацию пород Сибирской платформы в нижнем протерозое [Туркина и др., 2011] и отнесение их к протолитам алмазов [Барышев, Хачатрян, 2015], образованных в результате древней субдукции океанической коры.

Пользуясь разработанными ранее схемами, можно на примере начавшегося в нижнем протерозое вхождения северо-западной части Тихоокеанской плиты в зону Беньофа Японо-Сахалинской островной дуги представить субдукцию как прохождение субдуцируемой плитой нескольких этапов термического метаморфизма (рис. 1).

В нашем случае скорость субдуцируемой плиты – 2 см/год; угол погружения в зону Беньофа – $10\text{--}15^\circ$; возраст осадков – 180 млн лет; общая толща осадков – 1100 м; концентрация органических осадков – 400 млн т/км^2 ; концентрация минеральных осадков – 650 млн т/км^2 . Коэффициент концентрирования УВ (К), определяемый как отношение длины поглощения океанской плиты (величина закрытия) к величине горизонтального проложения, за 180 млн лет субдукции равен 5. Таким образом, концентрация углеводородов по сравнению с источником будет пятикратной.

На рис. 1:

сектор **А** (горизонтальное проложение трассы погружения плиты до температур метаморфизма $300\text{--}350^\circ\text{C}$; глубина вхождения плиты – 25 км; положение от тальвега желоба – 150–200 км). Аккреционная призма;

сектор **Б** (горизонтальное проложение трассы погружения в температурном интервале $350\text{--}800^\circ\text{C}$; глубина вхождения – 25–40 км; проложение от тальвега желоба – 200–250 км); начало формирования кислой магмы, потеря 55–60 мас. % ОВ на образование паров H_2O , CO_2 и эруптивных газов; выделение $10^{18} \text{ Дж/км}^2 \cdot \text{год}$ экзогенной энергии пиролиза ОВ; эксплозия газов и магмы; извержения;

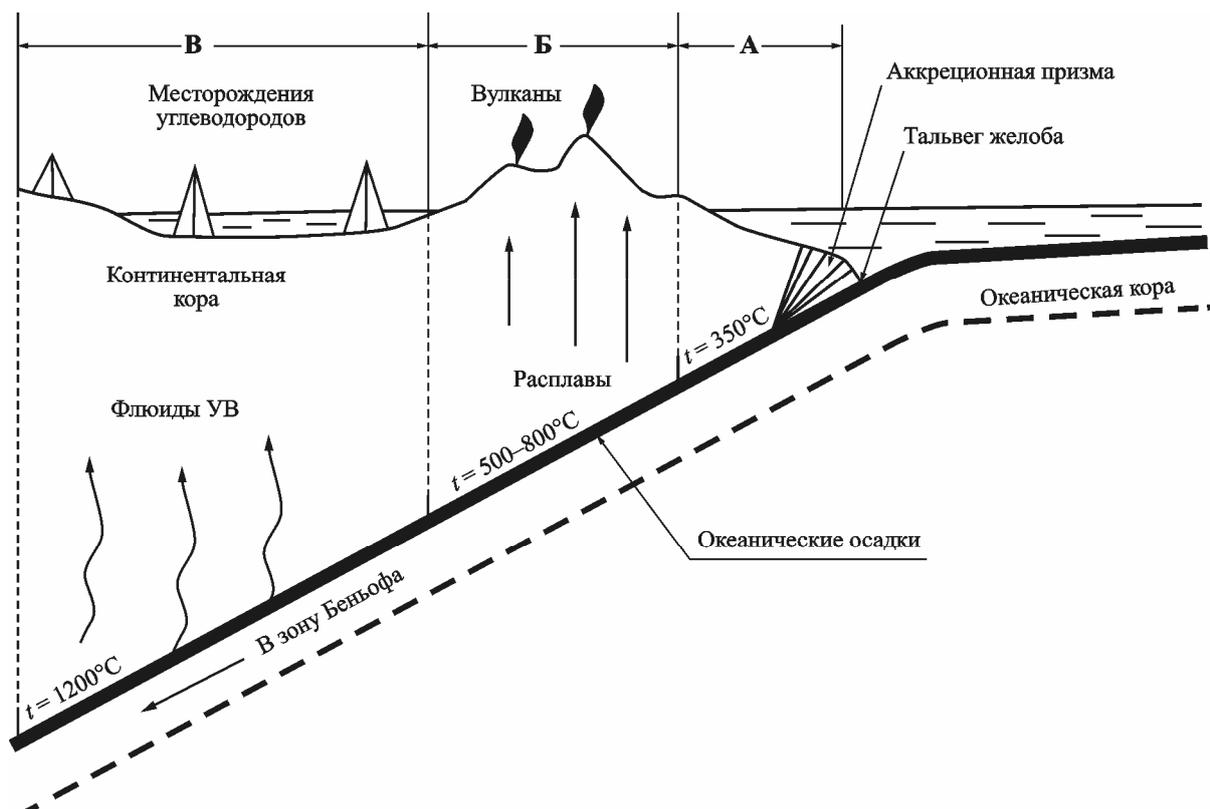


Рис. 1. Схема метаморфизма океанических осадков при субдукции (с использованием данных работ [Добрецов, 2010а; Тихонов, Ломнев, 2012; Савченко и др., 2015])

сектор **В** (горизонтальное положение трассы дайвинга в температурном интервале 800–1200 °С; глубина вхождения плиты – 40–80 км; проложение от тальвега желоба – 500–700 км). Выделение флюидов углеводородов – 25.3 мас. %; фильтрация в надсубдукционную кровлю; формирование УВ-системы. Твердая фаза C_{org} (8.0 мас. %) продолжает участвовать в мантийных течениях.

Вдоль трассы погружения плиты выделяются парогазовые флюиды разложения ОВ, которые, фильтруясь к поверхности, разделяются на конденсат (жидкие УВ и воду), неконденсируемые газы (CH_4 , CO_2 , N_2 , NCH) и еще на около 300 индивидуальных веществ общей массой 1–3 % ОВ. Образовавшиеся вещества участвуют во многих процессах металлогении и рудогенеза. Например, углекислота может выветривать силикаты по уравнению $CaSiO_3 + CO_2 \rightarrow CaCO_2 + SiO_2$, т.е. образовывать генетический ряд карбонатов и кремний. Кислородсодержащие осадки гальмиролиза базитов и гипербазитов на трассе вхождения в зону Бенъофа переплавляются в гранитоиды, формируя потоки эффузивов и интрузии. На рис. 1 видно, что термический метаморфизм ОВ осуществляется в основном на глубинах 30–40 км, где, по существу, происходит сухая перегонка (пиролиз) ОВ с выделением энергии в количестве до 1.94 МДж/кг ОВ, что составляет около 12 % энергии, затраченной на фотосинтез. Графитовая твердая фаза продолжает дайвинг, достигает нижней (500–700 км) границы конвекции, где из графита в составе протолита могут генерироваться алмазы и другие аллотропные соединения углерода.

Рассчитанные нами величины формирования внешних оболочек Земли позволили предположить следующую последовательность событий в биосферный период.

Предбиосферный Мировой океан имел все необходимые биогенные вещества (NPK, Ca, Mg, S, Fe, CO₂ и др.) в виде растворов. Первые автотрофы возникли в Мировом океане в фотической зоне глубиной до 50 м (современный пикопланктон – 200 м)

Особенность фотосинтетиков-гидробионтов состоит в том, что они выделяют кислород непосредственно в среду обитания, где на первых этапах он используется на окисление гидроксида железа и аммиака при питании с выделением N₂ и образованием осадков Fe₂O₃. Неограниченность на первых этапах ресурсов NPK и CO₂ и удаление O₂ как необходимого метаболита ОВ привело к безудержному росту флоры первичных водорослей («взрыв» биологической продуктивности).

С учетом скорости накопления осадков ОВ на формирование азотно-кислородной атмосферы и исчерпание ресурсов NH₃ в океане потребовалась не более 10 млн лет. Затем начался железорудный этап, основная фаза которого завершилась в нижнем протерозое, т.е. через 1.5 млрд лет после появления фототрофов. Эту растянутость во времени можно объяснить параллельно идущими процессами образования континентальной коры, железистых силикатов и атмосферы. На «чистый» железорудный процесс, исходя из эмиссии O₂ 837.8 Мт/год, потребовалась бы всего около 80 млн лет.

Удельный расход O₂ на образование континентальной коры равен 0.483 т O₂/м³ коры. Это значит, что темпы формирования континентов зависят от эмиссии O₂. До образования суши и появления наземных растений эмиссия O₂ составляла 837.8 Мт/год, что могло привести к формированию 1.74 км³ коры, а после появления суши и растений на ней – 4.07 км³/год.

Появление фотосинтеза и его участие в геодинамических событиях эволюции геосфер вызвало следующие параллельно идущие сопряженные процессы:

1) фотосинтез органического вещества и параллельный гальмиролиз излившихся пород при спрединге и аналогичных ему процессах;

2) формирование органогенных океанических осадков и параллельное накопление окисленных продуктов гальмиролиза, формирование органо-минеральной толщи океанических осадков;

3) погружение океанической коры с осадочным органо-минеральным чехлом в зоне палео- или существующих океанических желобов, а также поглощение океанической коры в результате коллизии при «закрытии» океанов, термический метаморфизм осадочного чехла океанической плиты, при следовании в зону Беньюфа в процессе коллизии и возникновение двух параллельных систем:

– системы генерации углеводородов;

– системы генерации континентальной коры.

Обе эти системы объединены надсистемой глобальной конвекции.

Система генерации углеводородов включает фотосинтез ОВ, накопление осадков ОВ в океанах и на суше, погружение этих осадков в недра, термический метаморфизм ОВ, выделение парогазовой фракции – флюидов метаморфизма, фильтрацию их через кровлю к поверхности, конденсацию, накопление конденсата и газов в коллекторах, т.е. скопление воды, нефти и газа, включение твердой фазы метаморфизма в астеносферно-мантийные течения, генерацию аллотропных модификаций C_{орг} вплоть до алмазов. Удельное насыщение общими углеводородами континентальной коры достигает 0.101 т/м³, или 37 кг/т коры.

Система генерации континентальной коры включает формирование структур эффузивов и интрузий зоны спрединга и их гальмиролиз с попутным окислением продуктов гальмиролиза и формированием осадочной окисленной толщи, следование осадочного

чехла вместе с океанической корой в зону Беньюфа, термический метаморфизм осадков на трассе дайвинга, выплавление из окисленных осадков пород континентальной коры с преобладанием кремнекислоты ($\text{SiO}_2 > 75\%$), разделение основных кислых расплавов, изменение пород магмы, формирование континентальной или островодужной коры.

Согласно геологическим данным, растительный покров на суше появился в раннем ордовике. С учетом выявленных механизмов роста объема коры и глобального «обмеления» Мирового океана предположение о том, что суша длительное время не заселялась растениями из-за многократных актов трансгрессий и регрессий, на наш взгляд, неправомерно. В действительности бурное развитие растительного покрова привело к формированию углей карбона всего через 50 млн лет после начала заселения суши.

Предполагать, что субтеррейны Родинии и Гондваны или более раннего Карелия были пустынными, безжизненными надводными участками суши с речной сетью, у нас нет оснований. Можно допустить, что еще в ордовике континенты представляли собой обширные гайоты, перерабатываемые прибоем приливов. С появлением на суше растительности рост континентов усилился как за счет увеличения осадков ОБ в океане, так и за счет формирования каустобиолитов угольного ряда.

В отношении влияния биосферы на палеоклиматическую обстановку можно отметить похолодание на Земле после формирования азотно-кислородной атмосферы, которое мы связываем с уменьшением (и, может быть, катастрофическим) содержания в атмосфере основного парникового газа – CO_2 .

Оледенений общепланетарного значения в биосферном периоде было несколько. Н.М. Чумаков [2015] выделяет следующие гляциоэры: Каапваальская – интервал 2970–2909 млн л.н. – с несколькими ледниковыми эпизодами; Гуронская – интервал 2400–2200 млн л.н. – прослеживается в Южной Канаде, Южной Африке, Западной Австралии; Африканская – поздний рифей, венд; Гондванская – включает раннепалеозойский, поздне-раннекарбонный, среднекарбонный и позднепермский гляциопериоды; Антарктическая – началась олигоценным оледенением в Антарктиде 34 млн л.н., включает несколько десятков эпизодов (только в Европе 15) и длится до настоящего времени.

Геологические материалы по оледенениям в интервале 2200–754 млн л.н. отсутствуют. Выявленные гляциоэры имеют продолжительность от сотен миллионов до 5–10 млн лет и характеризуются покровными оледенениями кратонов, присутствием мариногляциальных отложений, следами деятельности ледников (см. работу [Чумаков, 2015] и приведенную в ней литературу).

Наши исследования показывают, что ко времени появления первой гляциоэры длительность биосферного периода составляла 750 млн лет, а континентальной коры было сформировано всего около 20 % от ее нынешнего объема. Суша в архее отсутствовала. Объем континентов ко времени образования суши в силуре–раннем девоне составил 76.5 % современной величины. В этой связи мы предлагаем следующий сценарий оледенений.

На ранней стадии развития Земли (4.55–4.40 млн л.н.) образовался Мировой океан, затем была сформирована углекислотно-аммиачная атмосфера. Температурный режим атмосферы, в которой преобладали CO_2 , NH_4 и пары воды, в глобальном отношении не имел черт зональности. По мере остывания Земли температура атмосферы и океана снизилась до величин, оптимальных для фотосинтеза. Снижение общей температуры увеличило также растворимость CO_2 и NH_4 и уменьшило испаряемость и облачность, что, в свою очередь, увеличило проницаемость атмосферы для усвояемых хлорофиллом спектров солнечного света. Появились широтные климатические зоны. Согласно расчетам, всего на фотосинтез ОБ осадков было израсходовано 884.1 Пт CO_2 , что при-

вело к снижению содержания CO₂ в атмосфере и дальнейшему увеличению ее проницаемости.

Как указывалось выше, в позднем архее было сформировано около 25 % объема континентальной коры. Смена режимов конвекции с появлением фрагментов непотопляемых континентов привела к перестройке подводного рельефа, образованию океанических течений, возникновению циркуляции в атмосфере, проявлению различных видов цикличности, в том числе и в повторяемости оледенений.

Таким образом, оледенения являются результатом эндодинамически совокупного и взаимообусловленного действия биосферы, гидросферы, атмосферы и геодинамических процессов. Иными словами, развитие биосферы привело к оледенениям, а не оледенения изменили течение биосферных процессов, как утверждает Н.М. Чумаков [2015].

Обсуждение результатов

Результаты краткого анализа процесса глобальной эволюции Земли сводятся к следующему.

Полномасштабная конвекция, сопровождающая остывание формирующейся Земли, подготовила соответствующие для реализации возможности возникновения автотрофов температурные условия в океане и физическое состояние атмосферы (проницаемость для света усвояемых спектров).

«Добиосферный» океан был единой оболочкой со средней глубиной около 4476 м. Конвекция в мантии на глубину 1000 км создавала конвективную ячейку диаметром около 1400 км. Длина палеоокеанических хребтов при этом должна была равняться длине палеожелобов и составлять около 840 тыс. км. Превышения палеохребтов над палеожелобами достигало 2 км, что предполагает подводную эрозию и выветривание (гальмиролиз). В добиосферный период состав мантийной магмы был относительно стабильным и однородным; магма выполняла роль теплоносителя при конвекции в течение более 1 млрд лет.

Фотосинтез на Земле возник в океане, где имелись растворы всех необходимых биогенных веществ. В тепломассобменные процессы глобальной конвекции включались расходные и сопутствующие вещества фотосинтеза. CO₂ и H₂O стали извлекаться из атмосферных и гидросферных резервуаров, O₂ и ОВ включились в геохимические процессы окисления и метаморфизма.

Современным состоянием атмосферы, гидросферы, континентальной и океанической литосфер мы обязаны взаимодействию геодинамических, геофизических, геохимических и других эндогенных процессов и биосфере. При этом существенно, что фотосинтез – важнейшая функция биосферы – привлекает к участию в эволюции Земли космическую, солнечную энергию, сначала конвертируя ее в вещества фотосинтеза, а затем выделяя в виде экзогенной энергии термического метаморфизма ОВ в количестве, равном энергии произошедших за год землетрясений – $1.5 \cdot 10^{18}$ Дж.

Выводы

Все сказанное в настоящей статье позволяет сделать следующие выводы.

1. Геодинамические и геофизические процессы, прежде всего глобальная конвекция, во взаимодействии с биосферными факторами привели к формированию современного

состояния литосферы, гидросферы, атмосферы. Влияние этих факторов взаимообусловлено и взаимозависимо, они находятся в причинно-следственной связи друг с другом.

2. Эволюция биосферы сопровождалась (и сопровождается) образованием литосферы континентального типа, что имело следствием тектонику литосферных плит, формирование азотно-кислородной атмосферы и появление этапов оледенений.

3. В биосферный период эволюции Земли оформились углеводородная система и система генерации континентальной коры. Это выразилось в обмелении Мирового океана ежегодно на $0.7-1.0 \text{ км}^3$ и приросте континентальной коры до $3.8 \text{ км}^3/\text{год}$.

4. Расчетная ежегодная генерация углеводородов в недрах Земли достигает 198 млн т. Недра насыщены нефтью и газом, размещение месторождений которых связано исключительно с историей эволюции отдельных блоков континентальной коры и геодинамическими событиями в океанской и континентальной литосфере, при которых осуществлялись геофизические процессы в единой с биосферной эволюцией оболочек Земли. Относительная нефтегазоносность недр должна увеличиваться с глубиной.

5. В период развития тектоники литосферных плит в верхнюю мантию поступило около 100 Пт аллотропных модификаций углерода термического метаморфизма ОВ.

6. Исследование перспектив нефтегазоносности и алмазоносности должно опираться на палеогеодинамическую реконструкцию эволюции конкретных региональных геологических структур.

Литература

- Алексеев В.А.* Структура тепловой конвекции в мантии и образование глубинных нефти и газа // Материалы Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти, 22–25 окт. 2012 г. М.: ЦГЭ, 2012. С. 5–8.
- Барышев А.Н., Хачатрян Г.К.* Влияние тектонического поля напряжений на механизм роста, структуру кристаллов алмаза в связи с общей динамикой алмазообразования // Отечественная геология. 2015. № 1. С. 41–53.
- Бобров А.М., Баранов А.А.* Структура мантийных течений и поля напряжений в двумерной модели конвекции с неньютоновской реологией // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 7. С. 1015–1027.
- Вернадский В.И.* Избр. соч. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 5. С. 7–102.
- Геологический словарь. В 2-х т. М.: Недра, 1973.
- Добрецов Н.Л.* Периодичность геологических процессов и глубинная геодинамика // Геология и геофизика. 1994. Т. 35, № 5. С. 5–19.
- Добрецов Н.Л.* Мантийные плюмы и их роль в формировании анорогенных гранитоидов // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 12. С. 1243–1261.
- Добрецов Н.Л.* Геологические следствия теории термохимической модели плюмов // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 7. С. 587–604.
- Добрецов Н.Л.* Петрологические, геохимические и геодинамические особенности субдукционного магматизма // Петрология. 2010а. Т. 18, № 1. С. 88–110.
- Добрецов Н.Л.* Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // Геология и геофизика. 2010б. Т. 51, № 6. С. 761–784.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г.* Теплообмен и реология нижней мантии в ранние периоды развития Земли // Докл. РАН. 1995. Т. 345, № 1. С. 102–105.

- Дроздовская А.А., Снежко А.М.* Проблемы органического вещества в раннем докембрии // Обзор ВНИИ ВИЭМС / Отв. ред. Н.Н. Верзилин. М.: ВНИИ ВИЭМС, 1989. 55 с.
- Жамойда А.И.* Состояние и проблемы общей стратиграфической шкалы России // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 4. С. 655–670.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Заварзин Г.А.* Становление биосферы // Вестник РАН. 2001. Т. 71, № 11. С. 988–1001.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И.* Палеогеодинамика. М.: Наука, 1993. 192 с.
- Иванов А.В.* Обойдет ли Россию стороной «великий спор о плюмах»? // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 3. С. 417–420.
- Котелкин В.Д., Лобковский Л.И.* Циклические закономерности эволюции Земли в рамках термохимической модели мантийной конвекции // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики: Материалы 41-го тектон. совещ. М.: ГЕОС, 2008. С. 437–441.
- Лапо А.В.* Следы былых биосфер, или Рассказ о том, как устроена биосфера и что осталось от биосфер геологического прошлого. М.: Знание, 1987. 208 с.
- Менделеев Д.И.* Нефтяная промышленность в Северо-Американском штате Пенсильвания и на Кавказе // Сочинения. Т. X. М.: Изд-во АН СССР, 1949.
- Миловский А.В.* Минералогия и петрография: Учеб. для техникумов. М.: Недра, 1973. 368 с.
- Полевой В.В.* Физиология растений: Учеб. для биол. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1989. 464 с.
- Пуцаровский Ю.М., Пуцаровский Д.Ю.* Геосферы мантии Земли // Геотектоника. 1999. № 1. С. 3–14.
- Розанов А.Г.* Когда появилась жизнь на Земле // Вестн. РАН. 2010. Т. 80, № 5–6. С. 533–541.
- Савченко И.Ф., Белозеров Н.И., Римкевич В.С., Гиренко И.В.* Природа глобальной углеводородной системы и оценка перспектив региональной нефтегазоносности // Фундаментальные исследования. 2015. № 2. С. 3311–3315.
- Тихонов Г.К., Ломтев В.Л.* Мелкофокусная сейсмичность в тылу Японо-Сахалинской дуги и ее тектоническая природа // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: Вторая Всерос. науч. конф.: сб. докл. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2012. С. 34–38.
- Туркина О.М., Урманцева Л.Н., Бережная Н.Г., Сублев С.Г.* Формирование и мезоархейский метаморфизм гиперстеновых гнейсов в Иркутском гранулометрическом блоке (Шарыжалгайский выступ Сибирской платформы) // Геология и геофизика. Т. 56, № 1. С. 122–137.
- Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.Л. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- Хаин В.Е.* Основные проблемы современной геологии. М.: Науч. мир, 2003. 348 с.
- Хаин В.Е.* Взаимодействие атмосферы, биосферы и литосферы – важнейший процесс в развитии Земли // Вестн. РАН. 2007. Т. 77, № 9. С. 794–810.
- Хаин В.Е.* Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 6. С. 753–760.
- Хаин В.Е., Гончаров М.А.* Геодинамические циклы и геодинамические системы разного ранга, их соотношения и эволюция в истории Земли // Геотектоника. 2006. № 5. С. 3–24.
- Хачатрян Г.К.* Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений // Отечественная геология. 2013. № 2. С. 29–42.
- Чумаков Н.М.* Роль оледенений в биосфере // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 4. С. 694–702.
- Шкодзинский В.С.* Генезис кимберлитов и алмаза. Якутск: ОАО «Медиа-холдинг Якутия», 2009. 352 с.

Сведения об авторах

САВЧЕНКО Илья Федорович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и природопользования ДВО РАН. 675000, Амурская обл., г. Благовещенск, пер. Релочный, д. 1. Тел.: +7 (4162) 335-430. E-mail: sav@ascnet.ru

SAVCHENKO Ilya F. – Ph.D. (biol.), leading researcher, Institute of Geology and Nature Management FEB RAS. Blagoveshchenk, Russia. Tel.: +7 (4162) 335-430. E-mail: sav@ascnet.ru

БЕЛОЗЕРОВ Николай Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Амурский научный центр ДВО РАН. 675000, Амурская обл., г. Благовещенск, пер. Релочный, д. 1. Тел.: +7 (4162) 225-309. E-mail: nibic@rambler.ru

BELOZEROV Nikolay I. – Ph.D. (geol. and mineral.), researcher, Amur Scientific Centre FEB RAS. Blagoveshchensk, Russia. Tel.: +7 (4162) 225-309. E-mail: nibic@rambler.ru

ГИРЕНКО Ирина Витальевна – научный сотрудник, Институт геологии и природопользования ДВО РАН, 675000, Амурская область, г. Благовещенск, пер. Релочный, д. 1. Тел.: +7 (4162) 335-430. E-mail: girenko@inbox.ru

GIRENKO Irina V. – researcher, Institute of Geology and Nature Management FEB RAS. Blagoveshchenk, Russia. Tel.: +7 (4162) 335-430. E-mail: girenko@inbox.ru

GEOPHYSICAL PROCESSES, SOLAR ENERGY AND BIOSPHERE AS THE SYSTEM FACTORS OF THE EVOLUTION OF THE EARTH

I.F. Savchenko¹, N.I. Belozarov², I.V. Girenko¹

¹ Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia

² Amur Scientific Centre, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia

Abstract. The paper features the concept of biosphere impact on the Earth's evolution which is confirmed by the relevant calculations. According to this concept the shell structure was formed during the prebiosphere period. In this period the global convection occurred as the tectonics of small plates. The absence of the continents in this period excludes the involvement of water in oxidation of igneous rocks. During the biosphere period the photosynthetic organisms began to supply free oxygen and organic matters (OM) in their environment using the solar energy. Oxygen is involved in the geochemical processes of ore formation, nitrogen and oxygen of the atmosphere formation and in generation of granites from magma effusives. For the first time there distinguished the global systems of the granite generation of the continental crust and hydrocarbons (HC) which are formed at subduction-collision absorption of the oceanic crust. On the way to transition into the Benioff zone granites are melted out from the products of halmyrolysis enriched in oxygen and the thermal OM metamorphism yields solid allotropic carbon compounds, oil, combustible and other gases and is accompanied by the release of energy resulted from OM decomposition. This is one of the ways of the conversion of the biosphere solar energy into endodynamic processes of the Earth's evolution. The average annual precipitation of the primary organic matter in the ocean is 785.5 Mt and 1.7 km³ of the continental crust is generated there. During the biosphere period the World ocean became shallower by 904.5 mln km². Geodynamics, geophysical processes and primarily, the global convection interacting with the biosphere factors resulted in the formation of the modern state of the Earth's shells and the existence within the latter of hydrocarbons and the continental crust.

Keywords: geospheres, convection, halmyrolysis, photosynthesis, biosphere, geophysical processes, evolution.