

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ОБЪЕМ ВОД ПЕРВИЧНОГО ОКЕАНА ЗЕМЛИ

**С.Я. Сергин**

*Белгородский государственный  
национальный  
исследовательский  
университет, Россия, 308015,  
г. Белгород, ул. Победы, 85  
Филиал Российского  
государственного  
гидрометеорологического  
университета в г. Туапсе,  
Россия, 352800, г. Туапсе,  
ул. Морская, 4  
E-mail: s.sergin@bk.ru*

В работе рассматриваются космохимические предпосылки раннего происхождения гидросферы Земли и геологические свидетельства большого объема первичного океана. В соответствии с ними, геологическая эволюция началась в условиях полностью океанической поверхности планеты.

Ключевые слова: космохимия, планетная вода, гидросфера Земли, первичный океан, геологическая эволюция.

### Введение

В исследованиях докембрия установлено раннее возникновение на Земле гидросферы. Изотопные и петрографические данные по древним обломочным цирконам Западной Австралии указывают на то, что гидросфера появилась в диапазоне времени 4.2–4.4 млрд. лет [1]. Водно-осадочные породы архейских платформенных комплексов относятся к древнейшим из документированных геологических образований. Уже 3.8 млрд. лет назад существовала система литосфера – гидросфера – атмосфера – биота, где происходило осадконакопление, подобное современному [1, 2]. По имеющимся представлениям [3, 4, 5], источниками воды на Земле могли быть: водяной пар, лед и химически связанная вода околосолнечного протопланетного скопления космической материи; постепенное выделение воды в ходе дегазации недр планеты; поступление воды при падении на Землю метеоритов и комет. При всем том, остается открытым вопрос о значении каждого из них и возможном участии других источников. Остается неясной также история формирования океана.

В этой связи, в качестве источника возникновения воды автор рассматривает химические реакции, которые протекали в ходе аккреции протоземного космического материала [6]. При таком происхождении воды получает объяснение факт раннего ее присутствия на Земле и выявляется избыточный потенциал исследуемого источника по отношению к массе современной гидросферы. Вместе с тем, из анализа геологических данных выявляются независимые доказательства большого объема вод первичного океана. Совместный анализ сведений космогонического и геологического содержания представляется перспективным для понимания происхождения гидросферы и океана. Цель данной статьи – продвижение в избранном направлении исследования.

### Химическая генерация воды в процессе формирования Земли

Космическое пространство Солнечной системы, с его газопылевым веществом, астероидами и кометами, содержит воду в различных физико-химических состояниях. Спектроскопическими методами установлено присутствие свободной воды (в виде пара и льда) в околозвездных газопылевых дисках, которые, вероятно, дают начало планетам [4, 7, 8]. Широким распространением пользуется представление о том, что вода была компонентом околосолнечного диска и вошла в состав первичной гидросферы Земли. Многие авторы принимают идею о выделении связанной воды из минеральных компонентов диска в ходе его аккреции и нагрева [4, 5]. Но достаточно убедительных эмпирических данных и теоретических оценок по этим источникам воды на Земле пока не имеется. Нет оснований полагать, что они были главными.

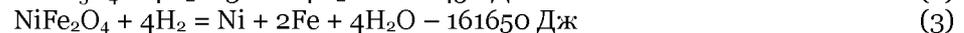
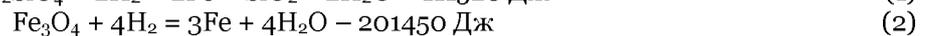
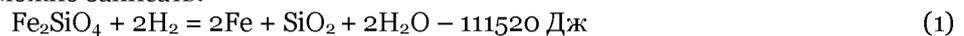
Не меньшего внимания заслуживает то, что на стадии аккреции протоземного материала и формирования планеты возможны окислительно-восстановительные реакции водорода с оксидами металлов, приводящие к образованию воды. О наличии водорода свидетельствует преобладание этого газа в космическом пространстве и околозвездных газопылевых дисках [4, 7, 8], а также существование на Земле водорода в составе воды, минералов с гидроксильной группой и углеводородов. Присутствие оксидов металлов, особенно железа, следует из того, что



они широко представлены в минералах метеоритов и в земных горных породах мантийного происхождения. Источниками тепла для окислительно-восстановительных реакций могли быть гравитационное сжатие протоземного «облака», экзотермичность самих реакций и распад радиоактивных элементов. Фактические данные об активном магматизме на ранней стадии существования Земли свидетельствуют об исходном нагретом ее состоянии [9, 10]. В целом, имели место необходимые предпосылки для взаимодействия водорода с оксидами металлов и образования воды.

Протоземным «облаком» мы будем называть скопление космического материала, вовлеченное в процесс формирования Земли на активной (завершающей) стадии аккреции. В космогонических построениях эта стадия менее всего изучена, хотя представляет наибольший интерес. Согласно имеющимся знаниям об околозвездных дисках [4, 7, 8], протоземное «облако» было неоднородным по составу. Во внутренней его части преобладали крупные плотные тела со значительной концентрацией свободного железа, а во внешней – газопылевая (преимущественно водородно-пылевая) смесь, плотность которой убывала к периферии «облака». По данным о минеральном составе метеоритов [11], в пылевой составляющей «облака» преобладали силикаты железа, магния, кальция и алюминия; оксиды железа, никеля, магния, алюминия и кремния; свободное и сернистое железо. В газовой фазе, кроме водорода, азота и других бескислородных газов, присутствовали оксиды углерода и серы [7, 8]. Зоной активного протекания окислительно-восстановительных реакций могла быть газопылевая область «облака» с повышенными температурами.

Запишем уравнения некоторых принципиально возможных реакций образования воды в «облаке». Определим тепловой эффект их протекания при стандартных условиях (давление 0.1 МПа и температура 298.15 К). На основе данных работы [12] об энтальпии (теплоте образования) соединений можно записать:



В расчете на образование 1 г/моля воды тепловые эффекты этих реакций таковы: – 55760 Дж (1); – 50363 Дж (2); – 40413 Дж (3); + 31815 Дж (4); + 80165 Дж (5). По этим и другим (не представленным здесь) данным, возникновение воды за счет силикатов железа и других металлов сопряжено с большими затратами энергии. Оксиды металлов более благоприятны для генерации воды. Оксиды углерода, серы и подобных «атмофильных» элементов тем более благоприятны, поскольку реагируют с водородом экзотермически, с выделением тепла. Однако, при небольшом содержании в «облаке» их вклад в образование воды вряд ли был существенным.

В зоне «облака» с высокими температурами затраты энергии на образование воды из оксидов металлов снижались – вплоть до смены эндотермического режима экзотермическим [3, 6]. Протеканию реакций типа (2) и (3) слева-направо способствовало удаление восстановленных металлов из реакционной зоны к гравитационному центру «облака», а воды – к его периферии. Таким образом, имеются физико-химические основания считать, что окислительно-восстановительные реакции участвовали в процессах аккреции протоземного «облака» и образования воды. Аккреция завершилась формированием не только первичной литосферы, как это принимается в космогонических построениях, но и гидросферы Земли.

Рассмотрим количественную сторону такого механизма раннего возникновения гидросферы. По имеющимся оценкам [11], доля железа в массе Земли составляет 30–37%, причём, основная его часть сосредоточена в металлическом ядре. Если бы все свободное железо (примерно 30% от массы Земли) образовалось путем его восстановления из оксидов, то на воду приходилось бы около 10% земной массы (в случае полного сохранения воды). Фактически на долю гидросферы приходится 0.024% земной массы. Различие этих значений можно объяснить тем, что в протоземном «облаке» преобладало не окисленное, а свободное железо. Не исключено также, что существенная часть образовавшейся воды была утрачена (из первичной атмосферы) под влиянием солнечного «ветра». В любом случае отмеченное различие показывает, что космохимический механизм (затрагивающий оксиды не только железа) обладал достаточным потенциалом для возникновения гидросферы. Учитывая это, оставим в стороне другие источники воды, роль которых не поддается оценке. Но не будем отрицать, что свободная и связанная вода протоземного «облака» внесла некоторый вклад в раннее образование гидросферы.

Космохимический механизм генерации воды поддается лабораторному изучению. Для этого нужно нагревать, в калориметрической «бомбе», газопылевые смеси, свойственные про-



тоземному «облаку». В серии такого рода опытов можно будет имитировать некоторые процессы заключительной стадии аккреции планеты.

### Геологические свидетельства полной океаничности ранней Земли

Космохимический механизм возникновения воды действовал в период образования планеты. Это дает основания считать, что масса гидросферы и объем вод океана были максимальными в начале геологического этапа развития Земли. Такой взгляд на происхождение гидросферы соответствует мнению о геологической вечности воды основателя современной геохимии В.И. Вернадского [13]: «...масса воды есть характерная постоянная нашей планеты» (с. 125). Впоследствии, если диффузия воды в космическое пространство превалировала над ее поступлением из Космоса, то объем океанских вод уменьшался. Автором предпринята проверка высказанных положений на основе независимых геологических данных [6]. Изложим и дополним имеющийся анализ.

Древнейшие изученные горные породы Земли – это метаморфические дериваты водно-осадочных отложений, приуроченные к гранит-зеленокаменным комплексам архейских участков континентальных платформ [1, 14]. Эти участки уже в среднем архее (примерно 3,5 млрд. лет назад) начали приобретать свойства кратонов – зрелых складчатых структур, утративших тектоническую активность, претерпевших эрозионное разрушение и осадконакопление, характерное для континентальных платформ. По мнению О.М. Розена [14], архейские кратоны образовались из микроконтинентов и были окружены водами первичного океана (рис.). В ходе дальнейшего формирования континентальной коры кратоны вошли в состав более крупных платформенных структур архейского и протерозойского возраста.

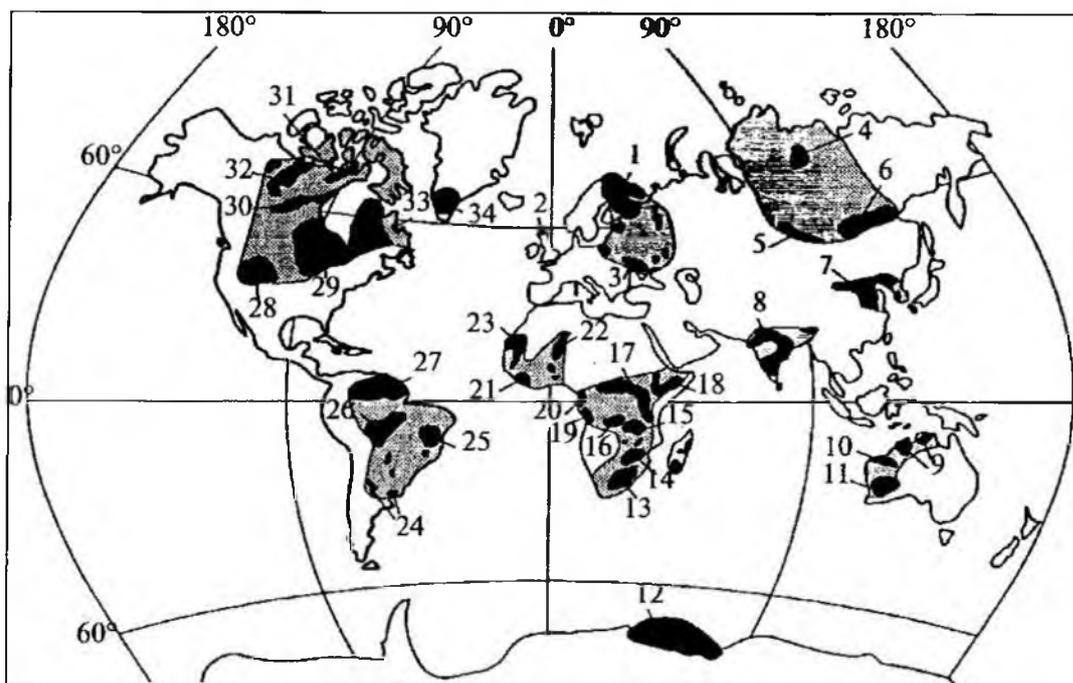


Рис. Глобальное распространение архея, частично в ассоциации с протерозоем (чёрное – выходы на поверхность, серое – под осадочным чехлом) [14]

- 1 – Балтийский щит; 2 – Шотландский щит; 3 – Украинский щит; 4 – Анабарский щит; 5 – Байкальский, Саянский, Енисейский складчатые пояса; 6 – Алданский щит; 7 – кратоны Сино-Корейский, Тарим и Янцзы; 8 – Индийский щит; 9 – комплексы Литчфилд, Рул-Джангл, Нанамбу; 10 – кратон Пилбара; 11 – кратон Йилгарн; 12 – комплекс Напьер; 13 – кратон Капвааль; 14 – кратон Зимбабве; 15 – блок Замбия; 16 – кратон Касаи; 17 – Центрально-Африканский кратон; 18 – Эфиопский блок; 19 – кратон Чайлу; 20 – комплекс Камерун-Нтем; 21 – щит Мэн; 22 – щит Туарег; 23 – щит Рерибат; 24 – массивы Рио-дела-Плата; 25 – кратон Сан-Франциско; 26 – кратон Гуапор; 27 – щит Гайяна; 28 – провинция Вайоминг; 29 – провинция Сьюперриор; 30 – группа Каминак; 31 – блок Комити-Бэй; 32 – провинция Слейв; 33 – щит Лабрадор; 34 – Гренландский щит

В отличие от протоконтинентов, фактических данных о геологическом строении и рельефе дна первичного океана не имеется. Более того, по весьма распространённой гипотезе постепенного образования гидросферы (вследствие дегазации земных недр и (или) аккумуляции



водосодержащего метеоритного материала) в раннем архее существовали только изолированные моря. Промежуточные пространства представляли собой не дно первичного океана, а области сноса.

С учетом этой гипотезы уточним позиции. В системной геотектонической концепции [6] автор принимает, что на исходной поверхности литосферы, покрытой океаном, существовали поднятия и прогибы различных масштабов. (Астеносферно-литосферная оболочка не могла быть повсеместно одинаковой по составу, плотности и гипсометрии). Мелководные области океана с относительно малоплотным (существенно алюмосиликатным) материалом отмеченной оболочки стали местом зарождения архипелагов вулканических островов и их превращения в микроконтиненты. Аналогичную позицию занимают А.К. Соколовский, В.Я. Федчук, А.К. Корсаков [15]. Они полагают, что в раннем архее имели место предпосылки для возникновения протоконтинентов и протоокеанов: изостатически приподнятые области с относительно мощной первичной корой и опущенные области с первичной корой более основного (базит-ультрабазитового) состава. Подобные взгляды находят поддержку [14, 16]. Опираясь на них, факт существования в раннем архее протоконтинентов и морей в их пределах означает, что промежуточное пространство было занято океаном.

Архейские структуры (см. рис.) занимают высотное положение в пределах от 0 до 1.5 км над уровнем моря. Такие же высоты характерны для более молодых континентальных платформ, возникших в протерозое и фанерозое. Равенство высот древних и молодых платформ, в условиях глобального изостатического равновесия, дает основу для оценки глубины и объёма вод океана архейского времени.

Глобальное изостатическое равновесие устанавливается в системе астеносфера-литосфера-гидросфера. Согласно модели Пратта (в которой предполагается наличие единого планетарного уровня компенсации массы вертикального столба системы в разных географических областях), континентальные и океанические платформы находятся в равновесии, если выполняется условие:

$$\rho_{кп}H_{кп} = \rho_{он}H_{он} + \rho_вh_в, \quad (6)$$

где  $H_{кп}$  и  $H_{он}$  – глубина уровня компенсации под этими платформами;  $\rho_{кп}$  и  $\rho_{он}$  – средняя плотность литосферно-астеносферного материала в толще от поверхности платформ до уровня компенсации;  $\rho_в$  и  $h_в$  – плотность и толщина слоя океанских вод.

Разность  $H_{кп}-H_{он} = \delta H$  представляет собой перепад высот между поверхностями континентальных и океанических платформ. С учетом (6) находим выражение для этой величины:

$$\delta H = ((\rho_{он} - \rho_{кп})/\rho_{он}) H_{кп} + (\rho_в/\rho_{он})h_в. \quad (7)$$

Все параметры и переменные формулы (7) немного варьируют в зависимости от выбранных участков платформ, но имеют характерные значения. При современном состоянии системы астеносфера-литосфера-гидросфера и значении  $H_{кп}=150$  км в [6] получена следующая связь  $\delta H$  с  $h_в$ :

$$\delta H = 4 + 0.3 h_в. \quad (8)$$

Некоторый разброс значений величины  $H_{кп}$ , имеющийся в литературе, не оказывает существенного влияния на параметры выражения (8). Современной глубине  $h_в = 5$  км (в пределах океанского ложа) соответствует значение  $\delta H = 5.5$  км и среднее возвышение поверхности континентальных платформ над уровнем моря на 0.5 км. С изменением глубины океана на 1 км перепад высот материковых платформ по отношению к океаническим увеличивается или уменьшается примерно на 0.3 км.

Выражения (7) и (8) в одинаковой мере касаются древних и молодых континентальных платформ. Равенство их высот означает, что свойственные им перепады  $\delta H$  почти не изменялись на протяжении геологической истории. Конечно, не исключено, что процессы эрозии и денудации сильнее всего затронули архейские платформы. В своем исходном состоянии они могли быть выше молодых. В таком случае, большей величине  $\delta H$  соответствовала более значительная глубина  $h_в$  древнего океана. Но не будем вводить допущения о процессах эрозии и денудации. Ограничимся тем, что малым изменениям  $\delta H$  сопутствовала стабильность глубин уровня компенсации  $H_{кп}$  под континентальными платформами разного возраста и консервативность величины  $\rho_{кп}$ . В свою очередь, плотность литосферно-астеносферного материала океанических платформ ( $\rho_{он}$ ) также не претерпевала значительных вариаций: океаническая кора, формировавшаяся на исходной океанической литосфере, имеет базитовый состав. Отсюда следует консервативность слагаемых в правой части соотношений (7) и (8), а также небольшая изменчивость глубины океана в течение геологического времени.

В раннем архее континенты только зарождались и занимали всего лишь часть своего современного пространства (40% поверхности Земли, с учётом подводных окраин). Вследствие этого и относительной стабильности  $h_в$  объём вод океана был больше современного, по видимому, на несколько десятков процентов.

Учитывая геологическое подтверждение большого объема вод первичного океана, главными событиями и этапами формирования перисферы Земли (ее геолого-географической оболочки) представляются следующие:

- 1) аккреция протопланетного «облака» и генерация воды;
- 2) возникновение литосферы и глобального океана;
- 3) появление и разрастание континентов.

На втором этапе устанавливается глобальное изостатическое равновесие. Континенты зарождаются в условиях этого равновесия, причем, соотношение  $\rho_{оп} > \rho_{кп}$  подстраивается к уже существующим значениям  $\rho_{оп}$  и  $h_в$ , характерным для океанского ложа. В ходе разрастания континентов отмеченные океанические факторы глобальной изостазии остаются стабильными. (Предположения о кардинальных изменениях литосферно-астеносферной оболочки и толщи вод океанского ложа имеются, но слабо аргументированы). Как следствие, разновозрастные континентальные платформы вынужденно приобретают почти одинаковое гипсометрическое положение.

Если же исходить из предположения о постепенной аккумуляции воды, то древнейшие орогены образовались бы на месте небольших морей, приуроченных к впадинам поверхности Земли. Там они находились бы в изостатическом равновесии с окружающими бортами впадин. По мере накопления морских вод орогены оказались бы в самых глубоководных областях океана и стали бы частью океанической литосферы – в полном противоречии с геологическими знаниями.

### **Возникновение и история воды на других планетах земной группы**

Космогонические представления дают основания полагать, что процессы образования планет земной группы, обусловленные аккрецией материала протопланетных «облаков», были взаимно подобными. При формировании Меркурия, Венеры, Луны и Марса протекали такие же окислительно-восстановительные реакции, как и в ходе формирования Земли. По завершении аккреции каждая из этих планет также обладала атмосферой со значительным количеством воды. Но последующая история воды была различной – в зависимости от термических условий на планетах, их массы и других факторов. В условиях действия «солнечного ветра» планеты в той или иной мере утрачивали свои газовые оболочки, в том числе водяной пар. Возможность долговременного сохранения воды на планетах, с учетом выражения для гравитационной силы в законе всемирного тяготения, была связана с их массой. Относительные планетные массы таковы [6]: Земля – 1; Меркурий – 0.055; Венера – 0.816; Луна – 0.012; Марс – 0.107.

На раннем этапе своего существования Луна и Марс обладали плотной атмосферой. Вследствие этого, а также умеренной удаленности от Солнца (1.0 и 1.524 а.е.), термические условия на их поверхности в некоторой мере приближались к современным термическим условиям на Земле. Можно полагать, что гидросферы обеих планет включали океаны. Потом Луна и Марс утратили основные запасы своих вод и практически всю атмосферу (особенно быстро – Луна). Однако часть их вод неизбежно сохранилась в толщах горных пород в виде подземных вод и льдов. Это теоретическое положение соответствует данным космических исследований о наличии воды (не в жидкой фазе) на Луне и Марсе [4]. На обеих планетах, надо полагать, имеются хотя бы маломощные водно-осадочные отложения, включая эвапориты. В этих отложениях могут быть следы зарождения жизни.

Вода, присутствовавшая в исходной атмосфере Меркурия и Венеры, вряд ли могла осадиться на их поверхности. Этому препятствовало горячее состояние планет как в начальную эпоху существования (после аккреционного образования), так и в последующие эпохи (вследствие интенсивного притока солнечной радиации). Меркурий быстро утратил свою атмосферу, с ее водяным паром. Атмосфера Венеры закономерно состоит из газов с большим молекулярным весом, главным образом из диоксида углерода. Небольшое содержание водяного пара в атмосфере Венеры можно объяснить первоочередной утратой этого газа.

### **Заключение**

Основным итогом данной работы можно считать выявление космохимических предпосылок раннего возникновения воды (и гидросферы) на Земле, а также геологических свидетельств большого объема вод первичного океана. Они согласуются между собой. Тем самым имеются основания для следующих выводов:

- главным источником воды на Земле были окислительно-восстановительные реакции между водородом и оксидами металлов в протопланетном «облаке» космической материи в период его аккреции;



- геологическая эволюция Земли началась в условиях полностью океанической поверхности планеты при массе гидросферы, немного превышавшей современную.

Полученные выводы о генерации воды на Земле можно распространить на все планеты земной группы. Протопланетные «облака» и процессы их аккреции, по-видимому, были взаимно подобными. Однако эволюция гидросферы на разных планетах была различной и привела к тому, что океан имеется только на Земле.

На данном этапе исследования не понадобилось вводить особые предположения о процессе аккреции, за исключением одного: значительный нагрев газопылевого материала в глубинной области протопланетного «облака». В дальнейшем следует изучить участие в этом нагреве экзотермических окислительно-восстановительных реакций, протекавших в водородной среде. Особый интерес представляет экспериментальное воспроизведение таких реакций (и сопутствующей генерации воды) в лабораторных термохимических установках.

#### Список литературы

1. Nutman A. P., Friend C.R.L., Bennett V.C. Review of the oldest (4400–3600 Ma) geological and mineralogical record: glimpses of the beginning // *Episodes* – 2001. – Vol. 24, № 2. – P. 93–100.
2. Сидоренко С.А. Органическое вещество и биолитогенные процессы в докембрии. – М.: Наука, 1991. – 104 с.
3. Войткевич Г.В. Основы теории происхождения Земли. – М.: Недра, 1988. – 112 с.
4. Dishoeck van, E.F., Bergin E.A., Lis D.C., Lunine J.I. Water: from clouds to planets. – *Protostars and Planets VI. University of Arizona Space Science Series. In press.* arXiv:1401.8103 (2014).
5. Hidenori G., Masahiro I. Origin of the ocean: early evolution of water D/H in a hydrogenrich atmosphere // *Icarus* – 2008. – Vol. 194, Iss. 1. – P. 42–52.
6. Сергин С.Я. Системная организация процессов геологического развития Земли. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2008. – 360 с.
7. Fogel J.K.J. et al. Chemistry of protoplanetary disk with grain settling and Ly $\alpha$  radiation // *Astrophys. J.* – 2011. – Vol. 726, № 1. – P. 1–18.
8. Semenov D. Chemical evolution of protoplanetary disk. – *The Molecular Universe. Proceedings IAU, Symposium No. 280.* – 2011. – P. 114–126.
9. Abe Y. Physical state of the very early Earth // *Lithos.* – 1993. – Vol.30. – P. 223–235.
10. Резанов И.А. История космогонической гипотезы О.Ю. Шмидта // *Вопросы истории естествознания и техники.* – 2002. – №4.
11. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров. Справочник по геохимии. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
12. Буллах А.Г., Кривовичев В.Г., Золотарёв А.А. Формулы минералов. Термодинамический анализ в минералогии и геохимии. – СПб., Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1995. – 260 с.
13. Вернадский В.И. Очерки геохимии. – М.: Наука, 1983. – 422 с.
14. Розен О.М. Стабилизация и начало распада архейских кратонов: формирование осадочных бассейнов, мафитовый магматизм, металлогеническая продуктивность // *Геотектоника.* – 2011. – № 1. – С. 3–27.
15. Соколовский А.К., Федчук В.Я., Корсаков А.К. Особенности строения и формирования протокосмохимической коры раннего архея // *Изв. ВУЗов. Сер. Геол. и разв.* – 2005. – № 6. – С. 3–5.
16. Ермаков Б.В., Шлезингер А.Е. Земная кора древних и молодых платформ // *Бюл. МОИП. Отд. Геол.* – 2008. Т. 83. Вып. 4. – С. 3–11.

## WATER ORIGIN AND VOLUME OF THE EARTH PRIMITIVE HYDROSPHERE

### S.Ya. Sergin

*Belgorod State National Research University, Pobedy St., 85, Belgorod, 308015, Russia*

*Russian State Hydrometeorological University, Tuapse Branch, Morskaja St., 4, Tuapse, 352800, Russia*

*E-mail: s.sergin@bk.ru*

The cosmochemical preconditions of early origin of the Earth's hydrosphere and geological evidences of large volume of the initial ocean are considered in the paper. In accordance with them, the geological evolution was begun in conditions of a completely oceanic surface of the planet.

Key words: cosmochemistry, planet's water, hydrosphere of the Earth, initial ocean, geological evolution.