

**В.В. Гончарук¹, Ю.Н. Демихов²,
А.О. Самсоны-Тодоров¹**

ГЕНЕЗИС ГИДРОСФЕРЫ В ЛЕТОПИСИ ИЗОТОПОВ

¹Институт коллоидной химии и химии воды им. А.В. Думанского
НАН Украины, г. Киев;

²Институт геохимии окружающей среды НАН Украины, г. Киев

Проведен критический обзор гипотез генезиса гидросферы. Показано, что природного фона нейтронов недостаточно для объяснения обогащения гидросферы дейтерием. Это позволило подтвердить предположение об атмофильном генезисе гидросферы. Обогащение вещества протопланетного облака дейтерием и, вероятно, литием, бериллием и бором способствовало формированию планет земной группы в солнечной системе.

Ключевые слова: атмофильный генезис, генезис гидросферы, гетерогенная аккреция, гомогенная аккреция, дейтерий, изотопный состав, мантия, протопланетное облако, протоземля, формирование Земли.

Введение. Генезис и эволюция гидросферы неразрывно связаны с историей Земли, и, прежде всего, с механизмом аккреции вещества протопланетного облака, приведшего к ее формированию. Однако относительно способа аккреции существуют следующие гипотезы:

– гомогенная аккреция предполагает образование квазиоднородной первичной Земли. Модель первоначально гомогенной по составу и строению Земли ранее пользовалась широким признанием. Согласно этой модели современное зональное строение Земли возникло лишь в ходе ее эволюции. При этом различают два варианта: "горячее" начало, при котором произошло разделение на оболочки [1], и "холодное" начало, при котором Земля сформировалась из остывшего газопылевого облака, а последующий разогрев и частичное плавление под воздействием радиоактивных источников тепла привели к дифференциации земного вещества [2];

– гетерогенная аккреция, определившая с самого начала главные черты строения земного шара – наличие в первичной Земле металли-

© В.В. Гончарук, Ю.Н. Демихов, А.О. Самсоны-Тодоров, 2014

ческого ядра и силикатной мантии, согласно которой первичная Земля аккумулировалась в той последовательности, в которой происходила конденсация веществ из первичной солнечной туманности [3–7]. При аккреции тугоплавких металлических частиц сначала возникло ядро; по мере остывания протопланетного облака на ядро осели более поздние конденсаты в виде силикатов, образовав мощную мантию первичной планеты. Конденсация воды и образование гидросферы и атмосферы, вероятно, были завершающим этапом формирования Земли [8].

В последнее время выявлены новые факты, которые могут пролить свет на генезис и эволюцию гео- и гидросфер, которые до настоящего времени по-прежнему остаются до конца неясными и дискуссионными. При этом, по нашему мнению, следует обратить внимание на весь процесс формирования солнечной системы и, вообще, на различия в известных планетных системах.

Изотопный состав легких изотопов достаточно чувствителен к внешним условиям и широко используется при генетических построениях. Сравним изотопный состав водорода и кислорода земных и космических объектов.

Содержание дейтерия в большинстве земных и космических объектах имеет тенденцию в сторону обеднения по сравнению с его содержанием в океанической воде [8–12]. Исключения составляют углистые хондриты, микрометеориты, молекулы галактического вещества и вода Марса, в которых, в ряде случаев, наблюдается обогащение дейтерием. Метеориты и образцы лунных пород отличаются по изотопному составу водорода от земных объектов. Отмечено исключительно низкое содержание воды в лунных породах, а некоторыми исследователями [9] ее присутствие вообще ставится под сомнение.

Гидросфера относительно горных пород и минералов в целом обогащена дейтерием и обеднена ^{18}O . Согласно гипотезе гомогенной аккреции Земли вода гидросферы выделилась из пород, слагающих Землю. При этом можно предположить близость изотопного состава кислорода и водорода воды гидросферы и земных пород (для "горячего" начала); или близость к равновесной разнице изотопного состава водорода и кислорода воды и пород (при относительно умеренных температурах, характерных для "холодного" начала). В обоих случаях в настоящее время существует возможность поступления воды в гидросферу из недр "ювенильной" воды (т.е. воды, ранее не присутствующей на поверхности планеты).

По гипотезе гетерогенной аккреции вода гидросферы сконденсировалась на заключительных этапах и являлась атмосферным образованием. В этом случае маловероятны как равновесные значения изотопного состава Н и О воды и горных пород, так и наличие заметных количеств "ювенильной" воды в недрах планеты.

Если исходить из гипотезы гомогенной аккреции, то гидросфера должна была образоваться в процессе дегазации и выхода на поверхность Земли ее легких компонентов при глобальном или частичном расплавлении первичного холодного гомогенного газо-пылевого тела. В этом случае вода первичного океана должна иметь относительное содержание ^{18}O от 7 до 9‰ [13], соответствующее изотопному отношению кислорода для базальтов или гранитов. Содержание дейтерия в воде первичного океана, если его принимать по изверженным породам [14], должно быть $\sim 80 - 60\%$, если делать оценку по вулканическому водяному пару и газам [15,16] – $\sim 60\%$, если ориентироваться на древние породы из верхней мантии – $48 \pm 20\%$, [17].

Последующее обеднение океанической воды ^{18}O могло происходить за счет накопления карбонатных и силикатных осадочных пород, которые обогащены тяжелым кислородом по сравнению с исходными изверженными породами. Было исследовано глобальное влияние процесса седиментации на изменение изотопного состава воды океана за всю обозримую историю Земли. Выявлено, что все накопившиеся осадочные породы (пелагические осадки, карбонаты, песчаники и глины) могли привести к обеднению гидросферы по ^{18}O на 3‰, а за весь послекембрийский период – всего на 0,6‰. Что касается дейтерия, то обогащение им океана при седиментации составляет не более 0,3‰, т. е. меньше, чем ошибки измерений. Поэтому авторы [18] полагают, что седиментация не оказала заметного влияния на изотопный состав океана за всю историю Земли.

В [8] предложено воспользоваться современными представлениями о тектонике плит и расширении дна океана для объяснения наблюдаемых пониженных значений δD для мантийных и изверженных пород и удаления протия из гидросферы. Гидроксидсодержащие минералы аутигенных морских осадков имеют значения, совпадающие с таковыми магматических основных и ультраосновных пород, которые составляют $\delta\text{D} = -40 \div -90\%$ [19]. Если допустить, что морские осадки через зоны субдукции (поддвига) непрерывно поступают в мантию, то можно принять этот процесс в качестве механизма питания мантийных пород

легким водородом. В этом случае за счет тех же морских осадков будет происходить непрерывное обеднение тяжелым кислородом гидросферы и обогащение им мантийных изверженных пород.

Однако результаты изотопного анализа оливинов и клинопироксенов (из пород вулкана Ключевского) со значениями $\delta^{18}\text{O}$ соответственно $5,8 \div 7,1$ и $6,2 \div 7,5\text{‰}$ не подтверждают это предположение [20]. В пироксенах из ультраосновных пород значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют $5 \div 6$, а в метеоритах – $3,5 \div 6,2\text{‰}$ [19]. Близость значений $\delta^{18}\text{O}$ в пироксенах мантии и метеоритах, скорее всего, указывает на отсутствие глобального влияния гидросферы на мантийные породы. В клинопироксенах из пород вулкана Ключевского значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют $6,2 \div 7,5\text{‰}$, что выше средних значений для мантии и метеоритов. Это свидетельствует о возможном региональном взаимодействии мантии с вышележащими оболочками Земли. По мнению авторов [20], избыток $\delta^{18}\text{O}$ был внесен в мантию региона флюидами из измененных при субдукции океанических базальтов. Флюиды, обогащенные ^{18}O , как считается, попадают в район вулкана Ключевского из субдуктирующей коры и океанического хребта, где существует наибольший "запас" флюида. Гидратизированный мантийный клин может быть вовлечен в островную магматическую деятельность в районе вулкана.

При сравнении массы гидросферы и массы мантии [21], с учетом концентрации кислорода (0,89% в гидросфере и 0,48% в мантии), видно, что в мантии содержится $1,9 \cdot 10^{27}$, а в гидросфере – $0,0012 \cdot 10^{27}$ г кислорода. Даже с учетом выделения в верхней мантии верхнего слоя толщиной порядка 350 км, в котором наблюдается интенсивная конвекция и который не смешивается с подстилающими мантийными породами, концентрация кислорода в этом слое превышает таковую в гидросфере более чем в 160 раз. Следовательно, увеличение $\delta^{18}\text{O}$ в породах этого слоя только на $0,03\text{‰}$ относительно значений в метеоритах (значению сравнимому с современной точностью определения $\delta^{18}\text{O}$) приводит к наблюдаемому содержанию $\delta^{18}\text{O}$ в океане.

Таким образом, предположение о накоплении протия в мантийных породах и накоплении дейтерия в гидросфере приводит к значениям изотопного состава кислорода гидросферы, не соответствующим реальным. Иными словами, гипотеза гомогенного начала Земли не подтверждается ее изотопными данными водорода и кислорода.

Диссипация. Рассмотрим влияние диссипации на формирование гидросферы.

В [22] скорость диссипации земного водорода составляет 10^9 частиц $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Принимая возраст Земли равным 4 млрд. лет и скорость диссипации постоянной, за весь период существования Земли в межпланетное пространство из молекул воды поступило водорода в количестве $6,5 \cdot 10^{25}$, что соответствует столбу воды высотой 20 м. Это составляет 0,4% массы наземных и подземных вод, что, по мнению авторов [22], несомненно преуменьшено.

В [23] предположено, что на ранней стадии развития Земли, когда кислорода не было в атмосфере, водород проникал в верхние слои первичной атмосферы в больших количествах и его диссипация в космическое пространство происходила более интенсивно, чем теперь. При современном строении атмосферы ускользание водорода в межпланетное пространство ограничивает процесс конденсации воды в тропосфере, где наблюдается низкая температура. По этой причине в современной атмосфере диссипация водорода, по мнению авторов [23], не может быть значительной. К тому же данный процесс, по-видимому, ограничивает и озоновый экран.

По вычислениям, проведенным [24], в межпланетное пространство ускользает в единицу времени 10^7 частиц $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что соответствует разложению слоя воды около 20 см в течение 4,5 млрд. лет. Авторы данной работы считают, что для окисления углерода, серы, азота и закиси железа земной коры необходимо было разложение (потеря) около 10% всей массы воды океанов, что соответствует слою воды $\approx 290 - 300$ м. При этом водород должен был улетучиться в космическое пространство.

По нашему мнению, этого не происходило, так как кислород образовался при фотоавтотрофном (биологическом) связывании углерода, в котором вода выступает электронным донором [25], т. е. практически весь выделившийся водород связывается в углеводороды и не покидает пределы Земли.

В [26] представлены результаты анализа данных, собранных космическим аппаратом Cluster, принадлежащим Европейскому космическому агентству, по интенсивности плазменного ветра, уносящего материю из магнитосферы Земли. Так, основными составляющими плазменного ветра являются ионы H^+ , He^+ , He^{++} и O^+ , его интенсивность достигает $\sim 5 \cdot 10^{26}$ ионов с^{-1} . Для упрощения будем считать, что всю интенсивность плазменного ветра составляют ионы водорода. С учетом того, что масса ионов водорода $6 \cdot 10^{23}$ составляют 1 г, то масса

$5 \cdot 10^{26}$ составит: в одну секунду – $(5/6) \cdot 10^3 \text{ г} = 0,83 \cdot 10^3 \text{ г}$; за одни сутки – $72 \cdot 10^6 \text{ г}$; за один год – $\sim 26 \cdot 10^9 \text{ г}$; за время существования Земли ($\sim 5 \cdot 10^9$ лет) – $1,30 \cdot 10^{20} \text{ г}$. Масса гидросферы – $1,4 \cdot 10^{24}$ [27], водорода гидросферы – $1,5 \cdot 10^{23} \text{ г}$. Таким образом, результаты определения интенсивности плазменного ветра показали, что за всю историю Земли, при условии постоянства интенсивности плазменного ветра во времени, потеря водорода не превышала 0,1%. Такая потеря водорода не могла сказаться на изотопном составе водорода гидросферы.

Возраст океана. В настоящее время установлена генетическая связь вод мирового океана, метеорных, геотермальных и молодых минералообразующих флюидов. Проведенные исследования [28, 29] указывают на постоянство изотопного и химического составов океанической воды, по крайней мере, с раннего протерозоя (~ 2000 млн. лет). Постоянство этих составов воды океана свидетельствует о постоянстве его объема (массы), т.е. в течение последних 2000 млн. лет поступление ювенильной воды из недр земли не наблюдалось. Постоянство объема гидросферы косвенно подтверждается и палеонтологическими данными. Биологические виды прошлого более или менее сходны с современными видами, что предполагает близость химического состава современного и древнего океанов, а следовательно, и их объема [30]. Физические и химические свойства океана, по-видимому, существенно не менялись в течение геологического времени (~ 3800 млн. лет) [8].

Исследования, частично финансировавшиеся NASA, подтвердили существование жидкой воды на поверхности Земли более 4 млрд. лет назад, при этом механизмы образования земной коры, ее эрозии и осаднения пород сложились уже 4,4 – 4,2 млрд. лет назад. Авторы [31, 32] пришли к этим выводам на основании изучения изотопного состава кислорода и уран-свинцового возраста кристаллов циркона, которые, согласно этим измерениям, образовались в самый ранний Хайденский период истории Земли – около 4,5 млрд. лет назад.

Значения изотопного отношения кислорода в цирконах с Джек-Хиллз, такие, как $\delta^{18}\text{O} = 7,5\text{‰}$, выше средних данных для мантии ($5 \div 6\text{‰}$) и метеоритов ($3,5 \div 6,2\text{‰}$), что указывает на возможное региональное взаимодействие мантии с вышележащими гидротермально измененными океаническими базальтами. Следовательно, уже 4,4 ÷ 4,2 млрд. лет назад на Земле существовала жидкая вода с изотопным составом кислорода, который близок к современному, а объем океана должен был близок к нынешнему.

Предположение об атмосферном образовании гидросферы и отсутствии заметного обеднения воды мирового океана дейтерием за геологическую историю требует обращения к космическим факторам обогащения гидросферы тяжелым водородом.

Проблема дейтерия. Следует отметить важность наличия в природе дейтерия. Слияние двух протонов с образованием дейтерия – первого изотопа первого элемента знаменовал собой качественно новый шаг, включающий возникновение нейтрона – частицы, сохраняющей стабильность только в составе ядра. Для синтеза дейтерия из двух протонов необходимы звездные температуры. Все последующее нуклеобразование можно характеризовать как количественное изменение числа протонов и нейтронов в новых ядрах.

К настоящему времени нет единого общепризнанного механизма образования дейтерия. Теория большого взрыва легко объясняет образование дейтерия. Однако следует отметить, что вещество первичной вселенной, возникшей после предполагаемого Большого взрыва, не менее трех – четырех раз прошло через горнило звездного термоядерного реактора. А как известно [33], в условиях звезды дейтерий мгновенно (в среднем за 6 с) сгорает, следовательно, протодейтерий Большого взрыва не мог дожить до наших дней.

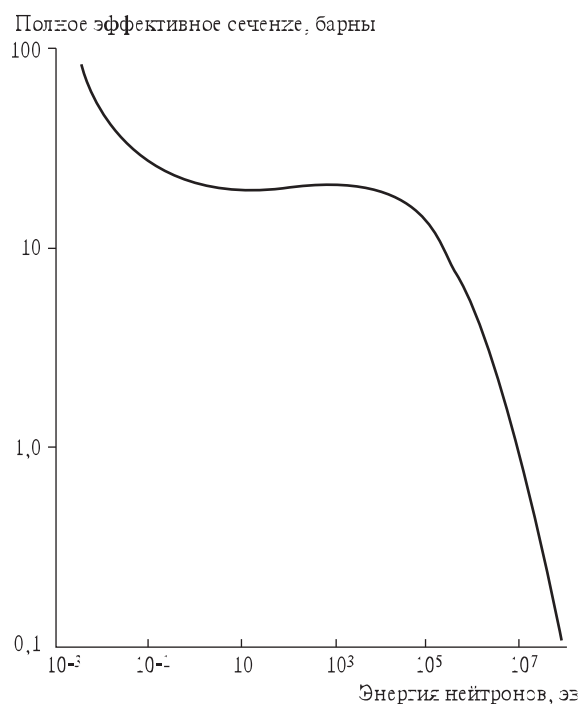
Существует три типа ядерных реакций, которые могут привести к образованию дейтерия:

- слияние двух ядер водорода $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$; для осуществления реакции требуются звездные температуры, однако, как отмечалось выше, в условиях звезды дейтерий не может накапливаться [33];
- радиационный захват нейтрона протием: $p + n \rightarrow D + \gamma$;
- взаимодействие частиц высоких энергий с ядрами, приводящее к испусканию ливня частиц, в том числе и дейтерия.

Рассмотрим ядерные реакции с поглощением нейтрона протием гидросферы. Сечение поглощения нейтронов протием хоть и маленькое, но конечное (рисунок). Однако в присутствии других ядер именно они будут преимущественно поглощать нейтроны. Это объясняется большим сечением захвата нейтронов большинством ядер и наличием у них при определенных энергиях резонансного поглощения, характеризующегося резким увеличением сечения захвата [34].

Как видно из рисунка, у протия не наблюдается резонансного поглощения и только для очень медленных нейтронов обеспечивается их полное поглощение. Однако в земных условиях в процессе замедле-

ния нейтронов до низких энергий очень вероятно их поглощение другими ядрами.



Зависимость полного эффективного сечения водорода от энергии нейтронов. Диапазон энергий от 10^{-3} эв до 10^8 Мэв [34].

Предположим, что на раннем этапе формирования Земли существовали температурные условия, при которых гидросфера находилась в газообразном состоянии. В этом случае молекулы воды значительно преобладали в атмосфере протоземли, и вторичные нейтроны космических лучей могли поглощаться преимущественно протием с образованием дейтерия.

Число нейтронов в одну минуту, возникающих в земной атмосфере, составляет $\sim 6 \cdot 10^{20}$ нейтронов/мин с ошибкой $\pm 25\%$. Таким образом, каждую минуту на Земле возникает от $4,5 \cdot 10^{20}$ до $7,5 \cdot 10^{20}$ нейтронов [35], за один год – $3,9 \cdot 10^{26}$ нейтронов.

Следует отметить, что в гидросфере содержится $1,47 \cdot 10^{43}$ атомов дейтерия. При сохранении сегодняшней интенсивности космических лучей за время существования Земли могло бы образоваться не более $3,9 \cdot 10^{26} \cdot 4,5 \cdot 10^9 = 1,8 \cdot 10^{35}$ атомов дейтерия, что составляет только одну стомиллионную часть дейтерия Земли.

Следовательно, космические лучи (при их наблюдаемой интенсивности) не могли привести к повышению содержания дейтерия в гидросфере. Для влияния космических лучей на концентрацию дейтерия интенсивность должна увеличиться в $10^{14} - 10^{17}$ раз. Возможно, такая их интенсивность могла существовать при взрыве сверхновой звезды, который привел к образованию протосолнечного облака.

В условиях Земли еще одним источником нейтронов является спонтанное осколочное деление U^{235} . Возможность поглощения всех этих нейтронов протием гидросферы очень мала, что следует из вышеупомянутых особенностей поглощения нейтронов и заметного преобладания урана в земной коре, а не в гидросфере. Тем не менее попытаемся теоретически оценить количество этих нейтронов.

Содержание урана в земном шаре (кларк) характеризуется величинами от $(0,93 \div 10,0) \cdot 10^{-8}$ г/г породы [36]. Исходя из его максимальной оценки $10,0 \cdot 10^{-8}$ г/г, массы Земли $6 \cdot 10^{27}$ г, содержания U^{235} 0,72% в природном уране, можно рассчитать, с учетом закона радиоактивного распада, что 4,5 млрд. лет назад Земля содержала $3 \cdot 10^{20}$ г или $7,7 \cdot 10^{41}$ атомов U^{235} . Так как процесс спонтанного деления менее вероятен, чем α -распад [22], при сравнении количества атомов земного дейтерия $1,47 \cdot 10^{43}$ и гипотетического, явно завышенного количества нейтронов (сравнимого с содержанием $U^{235} = 7,7 \cdot 10^{41}$ атомов), видно, что последних в ≈ 20 раз меньше, и распад урана не может объяснить обогащение гидросферы дейтерием.

Рассмотрим третий путь образования дейтерия за счет взаимодействия частиц высоких энергий с ядрами. Интенсивность вторичных нейтронов космических лучей составляет $2,3 \div 3,9 \cdot 10^{26}$ [35]. Эта величина сравнима с интенсивностью протонов космических лучей, т.е. количество частиц космических лучей за всю историю Земли на много порядков меньше количества дейтерия в гидросфере. Следовательно, вторичных дейтронов, образовавшихся при взаимодействии космических лучей с атмосферой, не хватит для компенсации их избытка в гидросфере.

Так какова природа обогащения гидросферы дейтерием? Наиболее обоснованной на сегодняшний день, по нашему мнению, следует признать гипотезу о повышении содержания дейтерия в воде протосолнечного облака в ходе обменных реакций $H_2 - H_2O$ и $H - CH$ при низких температурах. Действительно, если взять за исходное содержание дейтерия в галактике ($\delta D \approx -950\%$) относительно воды земного

океана, то, согласно [37], в системе вода пар – водород газ фракционирование изотопов водорода характеризуется выражением $10^3 \ln \alpha = 467,6(10^3 T^{-1}) - 303,9$, где α – коэффициент фракционирования изотопов между компонентами системы. Согласно этой формуле температура выхода воды из системы, т.е. температура ее конденсации, составит 372,9 К (99,8°C). Такой механизм объясняет изотопный состав гидросферы и постоянство ее физико-химического состава на всем протяжении геологической истории, а также подтверждает атмофильную природу гидросферы, возникшей на заключительных этапах гетерогенного образования Земли.

Происхождение подавляющего большинства изотопов тяжелых химических элементов, начиная с углерода и кончая долгоживущими трансактиниевыми нуклидами (а возможно, и сверхтяжелыми), связано с синтезом ядер в звездах и со взрывами звезд [38].

Происхождение дейтерия, лития, бериллия, бора в общей проблеме водорода представляет самостоятельный интерес, так как эти элементы легко разрушаются в термоядерных реакциях (их равновесные концентрации малы), и поэтому их эффективное "производство" возможно лишь в неравновесных процессах [39]. Такие неравновесные процессы предполагаются в рамках некоторых моделей космологии, как, например, образование дейтерия в реакции ${}^4\text{He}$ с антипротонами: $p + {}^4\text{He} \rightarrow \text{D} + n$. Однако наиболее распространенным является представление о динамичном образовании легких элементов с помощью реакций скалывания при взаимодействии галактических космических лучей с межзвездной средой: быстрые протоны и альфа-частицы в составе космических лучей бомбардируют ядра тяжелых элементов межзвездной среды и Солнечной системы, вызывая их расщепление на легкие ядра; быстрые ядра углерода, азота, кислорода в составе космических лучей, взаимодействуя с межзвездными ядрами водорода и гелия, также могут расщепиться на ядра легких элементов. При взрыве сверхновых звезд эти ядерные реакции могут производить наблюдаемые обилия ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$. Трудности возникают лишь при объяснении необычного изотопного состава Li и B (резко выраженное преобладание нечетных изотопов), а также при объяснении "производства" D и ${}^3\text{He}$, которые в указанных выше механизмах разрушаются явно быстрее, чем создаются. Распространение ударной волны во внешних оболочках сверхновой звезды и последующее охлаждение могут привести к реакциям синтеза $n + p \rightarrow \text{D} + \gamma$, $p + \text{D} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$.

Генезис гидросферы. Наиболее вероятным источником воды гидросферы считают углистые хондриты как из-за большого (до 20%) содержания в них воды, так и близости изотопного состава воды углистых хондритов и гидросферы. В [40] был изучен изотопный состав водорода в 86 метеоритах. Авторы считают, что в кометах и других объектах углистые хондриты являются наиболее вероятным источником воды гидросферы. Однако вода в углистых хондритах находится в виде гидроксилсодержащих минералов и может выделиться из них только при $\geq 500^\circ\text{C}$. Возникающие при этом несоответствия изотопного состава водорода и кислорода гео- и гидросфер были отмечены выше при рассмотрении гипотезы гомогенного начала Земли. Мы считаем, что механизмом образования гидросферы может быть конденсация воды из протопланетного облака при $\leq 372,9\text{ K}$. Если же принять, что изотопный состав водорода гидросферы сформировался за счет изотопных обменных реакций водород – вода, то при изотопном составе водорода протосолнца $D/H = 2 \cdot 10^{-5}$ [6, 40] температура конденсации воды составит $\sim 99,8^\circ\text{C}$. Совпадение же изотопного состава водорода гидросферы и углистых хондритов указывает, вероятно, только на близость температурных условий при их формировании. Однако при конденсации воды гидросферы непосредственно из протосолнечного облака возникает несоответствие количества воды в гидросфере. Действительно, в холодных облаках, как и в областях активного звездообразования, находится большое количество воды, так как вода – самая распространенная молекула (после молекулярного водорода и оксида углерода). Поэтому количество воды в гидросфере должно быть больше наблюдаемого.

Предположительно решение этой проблемы лежит в сравнении временных интервалов образования солнечной системы. Изотопный состав метеоритов указывает, что формирование Солнечной системы происходило $4,6 \pm 0,1$ млрд. лет назад и длилось не более 100 млн. лет. Одна из последних датировок метеоритов [41] равняется 4,568 млрд. лет, а уже 4,4 – 4,2 млрд. лет назад была сформирована гидросфера в близком к современному виде [31, 32].

Вероятно, механизм образования гидросферы был следующим. При накоплении достаточной массы Солнца и достижении температуры зажигания термоядерных реакций протий – дейтерий, протий – литий и других промежуточных реакций водород-водородного цикла температура Солнца быстро растет, что приводит к возникновению

реакций протий – протий и заметному излучению фотонов. Солнечный ветер постепенно выметает легкие составляющие протопланетного облака, в том числе и противевую воду, количество которой больше, чем воды, содержащей тяжелый дейтерий. Это приводит к обогащению дейтерием, возможно, параллельно с изотопно-обменными реакциями вода – водород, изотопного состава воды протоземного облака. За счет удаления, в первую очередь, быстрых горячих атомов и молекул, а также потери энергии при излучении в перпендикулярной плоскости эклиптики направлении температура протоземного облака быстро снижается, что способствует конденсации гидросферы.

Выводы. Гипотеза гомогенного начала Земли не находит подтверждения изотопными данными ее водорода и кислорода.

Как в современной, так и в древней атмосфере Земли диссипация водорода не может быть значительной.

Наиболее вероятными причинами обогащения гидросферы дейтерием могут быть обменные изотопные реакции при низких температурах и содержании дейтерия в протопланетном облаке $2 \cdot 10^{-5}$ D/H, а также возможное обогащения исходного вещества протопланетного облака дейтерием.

Обогащение протопланетного облака легкими элементами (дейтерием, литием, бериллием и бором) в дальнейшем способствовало более раннему началу термоядерных реакций в солнце, вероятно, на этапе формирования планет земной группы, с удалением из области планет земной группы водорода и гелия в область планет гигантов. В протопланетных облаках с низким содержанием дейтерия, из-за позднего зажигания термоядерных реакций, в непосредственной близости от будущей звезды происходит формирование планеты гигантов, однако формирование планет земной группы не наблюдается.

Резюме. Проведено критичний огляд гіпотез генезису гідросфери. Показано, що кількості природних нейтронів замало для пояснення збагачення гідросфери дейтерієм. Це дозволяє підтвердити припущення про атмофільний генезис гідросфери. Збагачення речовини протопланетного хмари дейтерієм і, імовірно, літієм, берилієм і бором сприяло формуванню планет земної групи в сонячній системі.

HYDROSPHERE GENESIS IN THE CHRONICLE OF ISOTOPES

Summary

The article provides a critical overview of the hypotheses of the genesis of the hydrosphere. It is shown that the amount of natural neutron not sufficient to explain the deuterium enrichment of the hydrosphere. This helped confirm the assumption of atmoфильном genesis of the hydrosphere. The enrichment of the protoplanetary cloud of deuterium and possibly lithium, beryllium and boron contributed to the formation of terrestrial planets in the solar system.

Список использованной литературы

- [1] *Goldschmidt V.M. Geochemistry.* – Oxford: University Press, 1954. – 730 p.
- [2] *Urey H. C. // Phys. and Chem. Earth.* – 1957. – 2. – P. 46–76.
- [3] *Добровольский С.П., Соботович Э.В., Флоренский К.П., Воробьев Г.Г. // Природа.* – 1967. – №8. – С. 88–96.
- [4] *Turekian K. K., Clark Jr. S.P. // Earth and Planet. Sci. Lett.* – 1969. – 6. – P.346–348.
- [5] *Виноградов А.И. // Геохимия.* – 1971. – №11. – С.1238–1296.
- [6] *Clark S.P., Turekian K. K., Grossman L. Model for the early history of the Earth. In Nature of the Solid Earth.* – New-York: McGraw-Hill, 1972. – 318 p.
- [7] *Рудник В.А., Соботович Э.В. Ранняя история Земли.* – М.:Недра, 1984. – 349 с.
- [8] *Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли.* – М.: Науч. мир, 2009. – 632 с.
- [9] *Epstein S., Taylor H.P. // Science.* – 1970. – 167. – P.533–535.
- [10] *Watson L.L., Hutcheon I.D., Epstein S., Stolper E.M. // SNC Meteorites Sci.* – 1994. – 265. – N5168. – P.86–90.
- [11] *Francois R. // Meteorites and the Early Solar.* – 2006. – 54. – P.341–352.
- [12] *Greenwood J. P., Itoh S., Sakamoto N. et al. //Geophys. Res. Lett.* –2008 – 35. – P.125–134.
- [13] *Silverman S.R.T. // Geochim. et Cosmochim. Acta.* – 1951. – 2. – P.26–42.
- [14] *Craig H. // Nuclear Geology on Geothermal Areas.* – 1963. – 133. – P.17–53.
- [15] *Arnason B., Sigurgeirsson T. // Proc. Symp. on Isotopes in Hydrology, IAEA, (Vienna, 14–18 November, 1966).* – Vienna, 1966. – P.35–47.

- [16] *Friedman I.* // Geolog. Survey Professional Paper. – 1967. – 575. – P.120–127.
- [17] *Sheppard S.M.F., Epstein S.* // Earth and Planet. Sci. Lett. – 1970. – 9. – P.232–239.
- [18] *Savin S.M., Epstein S.* // Geochim. et Cosmochim. Acta, – 1970. – 34. – P.43–63.
- [19] *Taylor H.P.* // Econ. Geol. – 1974. – 69. – N6. – P.843–883.
- [20] *Dorendorf F., Wiechert U., Worner G.* // Earth and Planet. Sci. Lett. – 2000. – 175, N12. – P.69–86.
- [21] *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
- [22] *Бютнер Э.К.* О диссипации водорода из атмосфер планет // Докл. АН СССР. – 1959. – 12, №1. – С.53–56.
- [23] *Urey H.C.* The planets, their origin and development. – New Haven; Connecticut: Yale Univ. Press., 1952. – 245 p.
- [24] *Urey H., Moller S.L.* // Science. – 1959. – 130. – P.245–251,
- [25] *Schidlowski M.* // Precambrian Res. – 1983. – 20, N 24. – P.319–335.
- [26] *Dandouras I.* // Ann. Geophys. – 2013. – 31. – P.1143–1153.
- [27] *Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.И. и др.* Справочник по геохимии. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
- [28] *Knauth L., Epstein S.* // Geochim. et cosmochim. acta. – 1976. – 40, N 9. – P.1095–1108.
- [29] *Демихов Ю.Н., Фомин Ю.А., Шибецкий Ю.А.* // Доп. НАН України. – 1997. – №6. – С.134–138.
- [30] *Боуэн Р.* Палеотемпературный анализ. – Л.: Недра, 1969. – 207 с.
- [31] *Valley J.W., Cavosie A.J., Wilde S.A.* // Chem. Geol. – 236, N1. – P.92–111.
- [32] *Valley J.W., Lackey J.S., Cavosie A.J. et al.* // Contrib. Mineral. Petrol. – 150. – P.561–580.
- [33] *Кузмичев В.Е.* Законы и формулы физики: Справочник. – К.: Наук. думка, 1989. – 862 с.
- [34] *Прайс В.* Регистрация ядерного излучения. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. – 270 с.
- [35] *Эйткин М. Дж.* Физика и археология. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 243 с.
- [36] *Войткевич Г.В., Закруткин В.В.* Основы геохимии. – М.: Высш. шк., 1976. – 368 с.
- [37] *Friedman I., O'Neil J.R.* Compilation of Stable Isotope fractionation Factors of Geochemical Interest. – Washington: Government Printing Office, 1977. – 440 p.

- [38] *Fowler W.A.* // Nobel. Lecture (Stockholm, 8 December, 1983). – Stockholm, 1983. – P.172–230.
- [39] *Крамаровский Я.М., Чечев В.И.* // Успехи физ. наук. – 1999. – 169, N 6. – С.643–652.
- [40] *Alexander C.M., Bowden O'D.R., Fogel M.L. et al.* // Science. – 2012. – 337. – P.721–723.
- [41] *Bouvier A., Wadhwa M.* // Nature Geosci. – 2010. – 3. – P.637–641.

Поступила в редакцию 18.07.2013 г.