

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 550.46:550.2

Член-корреспондент А. В. КУДЕЛЬСКИЙ

## О ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ ГЕНЕЗИСА ВОДЫ

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
kudelsky@nature.basnet.by*

Основу геологической концепции происхождения воды на Земле составляют представления о ее внутренних, планетарных источниках. Первичная («ювенильная») вода могла быть только химически связанной в твердом протопланетном веществе и выделяться в виде субмолекулярных частиц и молекулярной воды в условиях высоких температур (450–1500 °С) и давлений (0,3–≤120 ГПа) преимущественно в подастеносферной мантии, собственно астеносфере и выше, в коромантийном слое. Первичные поверхностные водопоявления (протоокеан) отличались высокой минерализацией, однако служили источником пресных вод вследствие естественной дистилляции – испарения с их поверхности и конденсации в условиях остывающей планеты. Поступление воды на Землю в составе вещества астероидов и комет рассматривается как дополнительное и менее значимое по массе.

*Ключевые слова:* протопланетное вещество, генезис воды, протоокеан, испарение – конденсация, пресные воды.

A. V. KUDELSKY

## ABOUT THE GEOLOGICAL CONCEPT OF THE ORIGIN OF WATER

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
kudelsky@nature.basnet.by*

The heart of the geological concept of the terrestrial water origin is based on the idea of internal planetary water resources. Initial («juvenile») water could only be chemically bounded to a solid protoplanetary substance and released as sub-molecular and molecular particles of water at high temperatures (450–1500 °C) and pressures (0.3–≤120 GPa) mainly in upper mantle, asthenosphere and be higher in the crust-mantle layer. The primary surface waters (protoocean) were characterized by high mineralization but they were the sources of fresh water due to natural distillation by means of evaporation from their surface and condensation in the cooling conditions of the planet. The water delivery to the Earth in the composition of asteroid and comet substances is considered as an additional and less significant water supply.

*Keywords:* protoplanetary substance, origin of water, protoocean, evaporation – condensation, fresh waters.

**Введение.** Проблема воды (и гидросферы вообще) стоит в основе более общих проблем формирования и эволюции Земли как планетарного образования, ее структуры и вещественного состава (петрология, геохимия, гидрогеология). От состояния наших представлений о генезисе и физико-химическом облике воды зависит, кроме того, уровень развития многих естественно-научных направлений и разработок и, в том числе, в области поисков, разведки и эксплуатации практически всех видов полезных ископаемых, используемых человечеством, – от собственно воды и специфических природных водных растворов (поликомпонентные рассолы, минеральные воды и др.), рудных и нерудных ископаемых до энергоносителей различного облика и происхождения (радиоактивные вещества, нефть и газ, термальные воды и др.).

**Общая информация по проблеме.** Исследованиями последних десятилетий с использованием межпланетных станций и высокоточной аналитической аппаратуры установлено повсеместное присутствие воды в космическом пространстве, основное вещество которого представлено межзвездными молекулярными облаками и облаками межзвездной пыли. Первые состоят из во-

дорода (~70 % по массе), гелия (~28 %), других элементов и простейших молекулярных соединений типа CH, CN, NH<sub>3</sub> и др. (~2 %). Межзвездную пыль составляют углеродные и силикатные частицы (размером ~0,1 мкм), замерзшие газы и водяной лед.

Согласно современным представлениям, Солнечная система сформировалась из большого вращающегося облака межзвездной пыли и газа – солнечной туманности. Газовая составляющая туманности была представлена водородом и гелием, образовавшимися вскоре после Большого взрыва, имевшего место 13,7 млрд лет назад, а также более тяжелыми элементами, выброшенными сверхновыми. Около 4,5 млрд лет назад вращение туманности, по-видимому, под воздействием ударной волны от ближайшей сверхновой или в процессе вращения самой туманности, начало ускоряться и под влиянием углового момента вращения, гравитации и инерционных сил сформировался протопланетный диск, с плоскостью перпендикулярной оси вращения. При отсутствии значительного углового момента вещество в центре туманности подверглось гравитационному сжатию, температура и давление в нем возросли настолько, что стал возможен процесс термоядерного синтеза гелия из водорода: появилась новая звезда – Солнце. Во внешней же части солнечной туманности под действием гравитации в местах возмущения плотности происходило укрупнение пылевидных частиц, формирование планетезималий и протопланет. Их вещественный состав и пространственная структура собственно солнечной планетарной системы определялись энергетикой образовавшегося Солнца [1].

Сформировавшиеся таким образом планеты Солнечной системы можно разделить на две группы: внутреннюю, представленную небольшими планетами с относительно высокой плотностью вещества – Меркурий, Венера, Земля и Марс, сложенными каменным и металлическим веществом, и внешнюю – Юпитер, Сатурн, Нептун и Уран – состоящими из более массивных, но менее плотных газово-жидких тел с каменными ядрами.

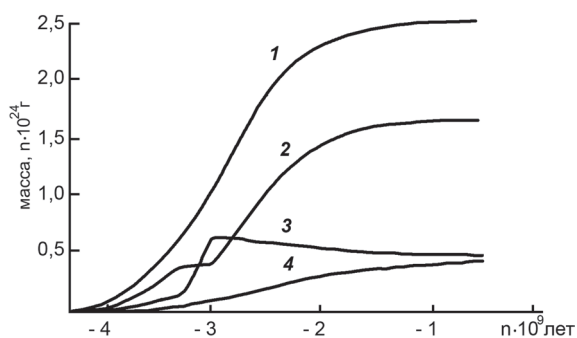
Основная масса воды в Солнечной системе связана с планетами-гигантами внешнего пояса и их крупными спутниками, отличающимися высоким содержанием (до 50 %) воды.

Водой принято обычно считать вещество состава H<sub>2</sub>O, однако в геологических образованиях Земли существуют и другие соединения водорода с кислородом, которые являются неотъемлемой частью воды или ее предшественниками и не могут быть исключены из общего понятия воды. К подобным структурным образованиям следует отнести ионы гидроксида OH<sup>-</sup> и гидроксония H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, гидроперекисный радикал HOO<sup>-</sup>, перексид водорода H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, экситон H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> (возбужденная молекула воды), гидратированный электрон  $\bar{e}_{aq}$  (в сочетании с H<sub>2</sub>O и H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>), положительно заряженная молекула воды (H<sub>2</sub>O)<sup>+</sup>.

Первичная («ювенильная») вода изначально могла быть только химически связанной в твердом веществе протопланетного облака, которое, согласно современным представлениям, может быть идентифицировано как хондритное. Хондриты представляют собой смесь силикатной (хондры, до 80 %), железной, сульфидной (троилитной), хромитной, углистой и фосфидной фаз, возникших путем агломерации в космическом вакууме холодного конденсированного вещества [2]. По А. П. Виноградову, содержание связанной воды в метеоритах в среднем составляет 0,5 % веса, при экстремальных содержаниях до 11,7–12,9 %. Позднее было установлено, что в углистых хондритах содержание воды может достигать 13,31–19,89 % (метеорит Оргей). Возможны метеориты и чисто ледяные, состоящие, правда, не только из водных льдов, но и из льдов аммиачных, углекислотных, метановых, этановых и циановодородных.

В соответствии с современными представлениями, ледяные кометы поступают из околосолнечного гипотетического облака Оорта [3], внешняя граница которого определяет гравитационную границу Солнечной системы – сферу Хилла, размер которой оценивается в 2 световых года. Полагают, что падение ледяных ядер космических тел может приводить к существенному росту запасов воды на Земле. Однако выполненными Е. С. Гавриленко и В. Ф. Дерпгольцем [4] оценками «астероидного» приращения земной гидросферы показано, что оно не столь значительно, чтобы принимать его в качестве основного источника воды на планете (в 1,5 тысячи раз меньше массы современного Мирового океана и в 2,5 тысячи раз меньше объема современной гидросферы Земли).

Помимо первичной воды, аккумулярованной в твердом веществе планеты, и воды, поступающей из межпланетного пространства с метеоритами, космической пылью и кометным веще-



Изменения со временем масс воды в поверхностной гидросфере и земной коре (по О. Г. Сорохтину): 1 – суммарная масса воды, дегазированной из мантии; 2 – масса воды в поверхностной гидросфере; 3 – масса связанной воды в океанической коре; 4 – масса связанной воды в континентальной коре

состоянии в веществе протопланетного облака, изначально составившего весь объем планеты и ее *внутренний* источник воды. Все остальные источники рассматриваются как несопоставимо менее значительные и дополнительные. Выделение воды из геологического субстрата Земли в свободное состояние происходило (и происходит) постепенно (рисунок) под влиянием и в процессе тепловой эволюции этого субстрата.

**Вода и геофлюиды земной коры и верхней мантии.** Генезис и физико-химическое состояние глубинной воды как планетарного образования определяется составом и термобарическим состоянием (РТ-состояние) твердого и твердопластичного вещества земных недр.

*Структура Земли.* В соответствии с сейсмологическими и петрологическими исследованиями [5], в строении Земли выделяется несколько геосфер: *земная кора, мантия и ядро.* *Земная кора* – слой «А» (табл. 1) твердой оболочки Земли средней мощностью примерно 33–35 км. *Мантия* – слой планетарного вещества, составляющего 83 % объема Земли и 67 % ее массы, с нижней границей на глубине 2900 км. Делится на *верхнюю* (слой «В» с нижней границей на глубине около 410 км), *среднюю* (слой «С» с глубинами залегания 410–1000 км) и *нижнюю* (слой «D» с глубинами 1000–2900 км) мантию. В геосфере «В» на глубинах 100–300 км прослеживается слой с пониженными плотностью, скоростями продольных и поперечных волн и вязкостью, называемый *астеносферой* (волновод Гутенберга). Вышележащая часть слоя «В» вместе с земной корой называется *литосферой*. *Ядро* составлено внешним псевдожидким слоем «Е» (2900–4980 км), переходным слоем «F» (4980–5120 км) и внутренней твердой сферой «G» (5120–6370 км).

Т а б л и ц а 1. Физические характеристики геосфер

Зона	Глубина, км	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Давление, ГПа	Температура, °С
A	0–33	3,32	1	
B	33–410	3,64	14	900–1200
C	410–1000	4,68	39	1370–1970
D'	1000–2700			1970–2700
D''	2700–2900	5,69–9,4	137	2900
E	2900–4980	11,5	317	
F	4980–5120			
G	5120–6370	17,2	364	3900

Приведенные геофизические границы достаточно условны, геосферы «А», «В», «С» (и даже «D») взаимно проникают друг в друга под воздействием преимущественно субдукционных погружений (слабы и отдельные блоки, blobs) и конвективно-диффузионных потоков вещества и энергии (термохимическая конвекция, плюмы и суперплюмы) перманентно перестраивающейся материальной системы мантии Земли.

ством, вода может возникать также в ионосфере Земли под воздействием космического излучения. На высоте полярных сияний (до 1100 км) и ниже посредством спектрального анализа в атмосфере Земли идентифицированы радикалы O<sub>2</sub><sup>+</sup>, атомы Н, О, ионы О<sup>-</sup> и О<sup>2+</sup>, что подтверждает потенциальную возможность образования молекул воды через ряд промежуточных реакций.

Первичная (ювенильная) вода может также формироваться (и формируется) в многочисленных реакциях окисления (например, горение метана CH<sub>4</sub> + 2O<sub>2</sub> = 2H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>).

С учетом сравнительного анализа продуктивности перечисленных источников воды, в геологии с высокой степенью вероятности принимается, что гидросфера Земли образована преимущественно из первичной воды, содержащейся в связанном

*Мантийное вещество и магматизм.* Первичный недифференцированный субстрат верхней мантии ассоциируется с пиrolитом (гипотетическое вещество мантии), соответствующим смеси  $\frac{1}{4}$  базальта и  $\frac{3}{4}$  перидотита. Гипотетически минеральный состав пиrolита представляется [6] смесью оливина  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  (57 %), ромбического пироксена  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_2$  (17 %), моноклинного пироксена  $(\text{Ca,Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_5$ – $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$  (12 %) и граната  $(\text{Mg,Fe,Ca})_3(\text{Al,Cr})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$  (14 %). Плавление пиrolита с последующим вертикальным перемещением базальтовых магм и связанных с ними трансмагматических восстановленных флюидов на основе  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{CH}_4$ , трансформирующихся при подъеме в сложные газо-водные флюидальные системы ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ , галогены и другие летучие) при варьирующих РТ-условиях, представляет собой важнейший механизм дифференциации и дегазации мантийного вещества. В результате формируются физико-химические неоднородности в мантийном субстрате, осуществляется вынос легколетучих дифференциатов, а также  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и множества других из низов верхней мантии и накопление их в подкоровом субстрате верхней мантии (волновод Гутенберга, или астеносфера) и в литосфере. Дифференциация мантийного вещества имеет место в районах РТ-нестабильности верхней мантии и, как следствие, высокой тектонической активности, провоцирующей формирование магматических расплавов, вулканических извержений и весьма разнообразных поствулканических процессов и явлений. С общей дифференциацией и дегазацией мантийного вещества связывается становление литосферы, формирование массы и состава атмосферы и гидросферы.

*Количество и источники воды в мантии.* В соответствии с представлениями [2; 7], мантия является важнейшим источником воды на поверхности Земли. Допуская, что содержание воды в породах мантии (0,21–0,48 %) соизмеримо с ее содержанием в каменных метеоритах (около 0,5 %), А. П. Виноградов определяет количество  $\text{H}_2\text{O}$  в мантийном веществе (вес  $4 \cdot 10^{27}$  г) величиной  $2 \cdot 10^{25}$  г. По мнению Ф. А. Макаренко (цит. по [4]), в верхней и нижней мантии содержится  $3 \cdot 10^{25}$  г воды, причем с верхней 400-километровой частью мантии связано столько же воды, сколько ее содержится в остальной 2500-километровой толще.

Приняв массу воды в мантии равной  $3 \cdot 10^{25}$  г, а количество воды в гидросфере  $1,5 \cdot 10^{24}$  г, можно определить обводненность первичного вещества мантии, участвовавшего в формировании земной коры и гидросферы (~5 %).

Существуют другие оценки количества воды в мантии. И. Д. Рябчиков [8] определяет концентрацию воды в деплетированной мантии (т. е. потерявшей некоторое количество расплава в геологическом прошлом) равной 0,014–0,034 масс. %, что с учетом принятой им массы мантийного материала  $4,068 \cdot 10^{24}$  г (по А. А. Беусу) составляет  $0,57 \cdot 10^{21}$ – $1,38 \cdot 10^{21}$  г. При этом есть все основания полагать безводными (вернее, только потенциально водосодержащими, имея в виду наличие водорода и кислорода) всю мантию ниже (глубже) изотермы 1500 °С (тепловая граница устойчивости  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  и др.), а также крупные блоки недифференцированного или слабо дифференцированного мантийного вещества зоны «В» ниже и выше волновода Гутенберга (астеносферы), не затронутые процессами глубинного тектогенеза (примитивная, неактивированная мантия).

*Физико-химическое состояние воды.* Как упомянуто выше, в зоне диссоциированных вод при температурах более 1500 °С вода как молекулярное образование не существует (табл. 2) из-за доминирования процесса диссоциации. Выше изотермы 1500 °С, соответствующей максимальной температуре базальтовой магмы, можно говорить о преимущественно ионном состоянии воды.

В соответствии с [9], формирование молекулярной воды связано с окислением водорода трансмантийных флюидов при его взаимодействии с кислородсодержащими породами (силикаты и др.). В гидрофизической зоне мономерных молекул воды ( $T = 700$ – $1100$  °С;  $5 < P < 10$  ГПа) вода не имеет водородных связей (величина энтропии 22,8–21,0), что свидетельствует о ее близкогообразном флюидальном состоянии, обеспечивающем перенос ионов с положительной энергией гидратации ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$  и др.) в форме гидридов, двойных хлоридов, комплексных соединений и полимеров, например, кремния, при их неограниченной смесимости в плотном (~1,72 г/см<sup>3</sup>) флюиде (табл. 2). Представляется очевидным, что только в докритической области (менее 374–450 °С) состояние воды соответствует жидкоподобному, в надкритических условиях ( $374 < T < 700$  °С и  $P > 0,25$ – $0,3$  ГПа) – состоянию относитель-



Т а б л и ц а 2. Свойства воды в различных гидрофизических зонах\*

Свойства воды	Зона твердых вод со структурой льда	Зона жидких структурированных вод	Зона уплотненного флюида с сиботаксической структурой	Зона мономерных молекул воды	Зона диссоциированных вод
	Температура (°С) и давление (ГПа)				
Показатель	$T < 0$	$0 < T < 450$ ; $P < 0,3$	$T = 450-700$ ; $0,3 < P < 5$	$T = 700-1100$ ; $5 < P < 10$	$T > 1100$ ; $10 < P \leq 120$
Диэлектрическая проницаемость	88,2	81–20	20–12,5	12,5–5	5–1,25
Энтропия, кал/г · град	10–9	28–23,2	23,2–22,8	22,8–21,0	–
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1–0,9	1,5–1,0	1,0–0,3	1,72	–
Вязкость, мПа · с	3,0	1,79–0,076	0,076–0,057	0,057–0,055	–
Диссоциация	$3,8 \cdot 10^{-22}$	$10^{-9}-10^{-13}$	$10^{-7}-10^{-9}$	$10^{-4}-10^{-7}$	$10^{-2}$

П р и м е ч а н и е. \* – по данным (Ильин, 1972) с доп. автора.

но высокодиссоциированной ( $1,2 \cdot 10^{-10}-1,9 \cdot 10^{-9}$ ) жидкости со свойствами активного химического реагента и, в меньшей мере, растворителя, способного, тем не менее, обеспечить перемещение значительного количества вещества в составе флюида фазы. В надкритических условиях литосферы возможны существенно жидкоподобные, газоподобные и промежуточные между ними состояния воды. Подобному флюидальному состоянию свойственны неограниченная смесимость воды, газов, разнообразных минеральных соединений, элементов и ионных ассоциаций, а также фазовая неустойчивость при даже незначительных вариациях в системе P-V-T. Генетически близкими семейству ювенильных вод представляются метаморфогенные водно-газовые флюиды и реституционные постметаморфические водные растворы.

**Гидросфера Земли.** О первых 500–600 млн лет истории Земли можно судить в основном гипотетически. В соответствии с теоретическими расчетами А. Е. Рингвуда [10], оформилась концепция существования в этот период расплавленной верхней оболочки протопланетного вещества Земли мощностью 400–700 км. Последующее остывание и кристаллизация вещества этой оболочки привели к формированию протолитовой коры (3,6 млрд лет) и астеносферы, а в конце архея и раннем протерозое (2,6 млрд лет) – фрагментов материковой коры, атмосферы и гидросферы. Появление воды в составе глубинного геофлюида, представленного преимущественно водородом, окисляющимся до H<sub>2</sub>O в силикатных образованиях первичной коры, и «калиевый взрыв» с последующей гранитизацией континентальной коры на границе архея и протерозоя (4,0–3,6 млрд лет), по-видимому, были синхронны и взаимообусловлены [1]. С рубежа примерно 4,0 млрд лет, когда температура поверхности планеты снизилась до 100 °С и ниже появились условия для образования поверхностных вод и протоокеана. Согласно оценкам И. Д. Рябчикова [11], на формирование поверхностных водоемов было израсходовано до 70–75 % содержания в мантии ювенильных вод, оставшихся в ней после гидратации породообразующих минералов (серпентизация и др.) на ранних этапах развития Земли.

Максимальная дегидратация мантийного вещества с выходом ювенильных вод ( $1,25 \cdot 10^{15}$  г/год) имела место в начале протерозоя (2,5 млрд лет назад), постепенно снижаясь она достигла  $0,25 \cdot 10^{15}$  г/год в современную эпоху [12].

По мере перемещения надкритических геофлюидов из подастеносферной мантии, астеносферы и коромантийного слоя в области относительно пониженных температур подобные флюиды перманентно расслаиваются с появлением ассоциированной воды, разрушением ранее созданных группировок летучих и, как следствие, выпадением ряда из них. Приобретая черты активного химического реагента и растворителя, вода способна перемещать значительное количество растворенного вещества и на всех этапах расслоения флюидов и перманентного роста объемов водных ассоциантов оставаться высокоминерализованной жидкостью – своеобразным жидкофазным «реститом» из сферы процессов метаморфизма горных пород. Об этом свидетельствуют не только данные декрипитации газовой-жидких включений в минералах горных пород различных фаций метаморфизма [13; 14], но и повсеместное присутствие высокоминерализованных (до и более 300 г/л) вод и рассолов в кристаллическом фундаменте древних платформ вне

областей галогенеза [15–17]. Сведения о составе эндогенных соленых вод и рассолов в фундаменте древних платформ и современных терм Срединно-океанических рифтов [18] позволяют выделить некоторые специфические черты их геохимического облика. Среди важнейших из них: высокая минерализация (до и более 300 г/дм<sup>3</sup>), хлоридный натриевый (редко кальциевый) состав, высокие содержания калия ( $r_{Na^+}/r_{K^+} < 200$ ), закисного железа, относительно низкие pH (<6,0–6,5) и преимущественно восстановленные рассолорастворенные газы.

Оценивая приведенные выше материалы с позиции теории гидрогеологии и проблем формирования подземных вод, представляются бесспорными данные о высокой «солевой» нагрузке надкритических флюидов. Поэтому встречающиеся иногда попытки рассматривать верхнюю мантию как потенциальный возобновляемый источник пресной воды [19] являются необоснованными. Пресноводная составляющая подземной гидросферы обязана своим происхождением только (и только!) инфильтрации пресных поверхностных вод, формирующихся в процессе испарения с земной поверхности и водных бассейнов (океаны, моря, реки, болота) (табл. 3), атмосферного переноса парообразной воды, ее конденсации и выпадения в виде гидрометеоров. Других сколько-нибудь значимых естественных источников пресной воды не существует.

Т а б л и ц а 3. Поверхностная и приповерхностная пресноводная гидросфера Земли (по М. И. Львовичу [20])

Часть гидросферы	Объем (с округлением), тыс км <sup>3</sup>
Океан	1370000
Подземные воды	60000
В том числе зоны активного водообмена	4000
Полярные ледники	24000
Поверхностные воды суши	280
Реки	1,2
Почвенная влага	80
Пары атмосферы	14
Вся гидросфера	1454000

**Заключение.** Таким образом, основу геологической концепции происхождения воды на Земле составляют представления о ее внутренних, планетарных, источниках. Принимается достаточно вероятным, что на первых этапах становления планеты в результате плавления и дегазации верхней мантии на поверхность Земли могли поступать три фракции мантийного материала: *базальтовая магма*, «растворенные» в ней *вода* и *паро-газовые ассоциации* множества элементов и соединений (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl, HF, He, Ne, Ar, Kr, Xe и некоторые др.). Все они составили первичную атмосферу Земли, из вещества которой формировалась гидросфера и протоокеан, причем ранние конденсированные воды на Земле были кислыми и высокоминерализованными. В анионной части первичных водных растворов и вод первичного протоокеана доминировал Cl, присутствовали F, Br, I и многочисленная группа металлов. Пресные воды и пресноводная гидросфера Земли с присущей им низкой минерализацией, набором анионов и катионов появляются позднее вследствие процессов естественной дистилляции – испарения с поверхности первичных водоемов и конденсации в благоприятных условиях остывающей планеты.

Поступление воды на Землю в составе астероидов и комет в геологии рассматривается как дополнительное и менее значимое по массе.

### Список использованной литературы

1. Ларин, В. Н. Гипотеза изначальной гидридной Земли / В. Н. Ларин. – М.: «Недра», 1980. – 216 с.
2. Виноградов, А. П. Метеориты и земная кора / А. П. Виноградов // Изв. АН СССР. Сер. «Геология». – 1959. – № 10. – С. 5–27.
3. Oort, Jan. The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin / Jan Oort // Bull. Astron. Inst. Neth. – 1950 – Vol. 11. – P. 91–110.
4. Гавриленко, Е. С. Глубинная гидросфера Земли / Е. С. Гавриленко, В. Ф. Дерпгольд. – Киев: «Наукова думка», 1971. – 272 с.

5. Булен, К. Сейсмология и внутреннее строение Земли / К. Булен. – М.: Иностр. лит., 1958. – С. 97–127.
6. Akaogi, M. Mineral physics pertinent to the constitution of the mantle and core / M. Akaogi // J. Phys. Earth. – 1995. – Vol. 43. – P. 457–478.
7. Kulp, J. L. Origin of the hydrosphere / J. L. Kulp // Bull. Geol. Soc. Am. – 1951. – Vol. 62. – P. 326–329.
8. Рябчиков, И. Д. Водные растворы в верхней мантии и проблемы дегазации Земли / И. Д. Рябчиков // Подземные воды и эволюция литосферы. Мат. Всесоюзной конф. – М.: Наука, 1985. – Т. I. – С. 176–186.
9. Ильин, В. А. Состояние и свойства воды в глубоких горизонтах земной коры / В. А. Ильин // Изв. вузов. Геол. и разведка. – 1972. – № 10. – С. 77–82.
10. Рингвуд, А. Е. Состав и происхождение Земли / А. Е. Рингвуд. – М.: «Наука», 1981. – 113 с.
11. Рябчиков, И. Д. Флюидный режим мантии Земли / И. Д. Рябчиков // Вестн. ОГГГН РАН. – 1999. – № 3 (9). – С. 141–153.
12. Сорохтин, О. Г. Теория развития Земли: происхождение, развитие и трагическое будущее / О. Г. Сорохтин, Дж. В. Чилингар, О. Н. Сорохтин. – М.; Ижевск: ИКИ, 2010. – 752 с.
13. Touret, J. Fluid inclusions in high grade metamorphic rocks / J. Touret // Short Course in Fluid Inclusions: Application to Petrology / ed. by L. S. Hollister and M. L. Crawford. – Canada, 1981. – P. 182–208.
14. Кроуфорд, М. Л. Природа метаморфических флюидов по данным изучения флюидных включений / М. Л. Кроуфорд, Л. С. Холлистер // Взаимодействие флюид–порода при метаморфизме. – М.: Мир, 1989. – С. 9–48.
15. Соленые воды и рассолы Балтийского щита / А. И. Коротков [и др.] // Докл. АН СССР. – 1978. – Т. 238, № 9. – С. 951–954.
16. Вовк, И. Ф. Рассолы кристаллического фундамента щитов / И. Ф. Вовк. – Киев, 1982. – 164 с.
17. Кудельский, А. В. Высокоминерализованные воды и рассолы в верхнепротерозойских отложениях и кристаллическом фундаменте древних платформ (на примере Восточно-Европейской платформы и территории Беларуси) / А. В. Кудельский // Литосфера. – 2005. – № 2(23). – С. 9–21.
18. Кононов, В. И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма / В. И. Кононов. – М.: Недра, 1983. – 214 с.
19. Грачев, А. Ф. Рифтовые зоны Земли / А. Ф. Грачев. – М.: Недра, 1987. – 285 с.
20. Львович, М. И. Вода и жизнь / М. И. Львович. – М.: «Мысль», 1986. – 254 с.

Поступило в редакцию 27.05.2015