

О ВОЗМОЖНОМ КОМПЕНСАЦИОННОМ МЕХАНИЗМЕ ДЕГИДРАТАЦИИ МАНТИИ

В.П. Зверев

Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН, Москва

e-mail: zverev@geoenv.ru

Земля, как и другие планеты Солнечной системы, образовалась в результате аккреции и аккумуляции сначала восстановленных и обедненных летучими энстатитовых хондритов (~ 85% массы), а затем – богатых летучими, окисленных углистых хондритов. Эти процессы развивались по геологическим масштабам времени достаточно быстро – примерно 20 млн лет. Наиболее активная аккумуляция летучих на Земле связана с поступлением последней (~ 1%) порции углистых хондритов [1]. Основная масса летучих, захваченных планетами, была представлена водородом (~ 70 об.%) и гелием (~ 30 об.%) Содержание собственно воды было невелико и составляло порядка 10^{-5} об.%. Разогрев планет и внутренняя дифференциация их вещества сопровождалась дегазацией, темпы и масштабы которой во многом зависели от массы планеты и ее расстояния до Солнца, что, в свою очередь, определило особенности распределения и эволюции воды на каждой из планет земной группы. В отличие от других летучих основная масса воды не покинула Землю, а на ранних этапах развития планеты в результате процессов гидратации вошла в состав ее твердой фазы.

Содержание воды в гипотетической примитивной мантии Земли оценено И.Д. Рябчиковым [2] примерно в 0,1% ее массы, что составляет порядка $4 \cdot 10^{24}$ г. Этим же автором сделан вывод, что содержание H_2O в стеклах MORB (190 г/т) соответствует концентрации воды в деплетированной и дегазированной верхней мантии. Исходя из этого, в настоящее время в мантии находится $\sim 1 \cdot 10^{24}$ г H_2O и, соответственно, около $3 \cdot 10^{24}$ г воды было дегазировано. Значительная часть этой дегазированной массы пошла на формирование поверхностной и подземной гидросфер, которое началось, судя по изотопным данным, на рубеже архея – 4 млрд лет тому назад. Средние темпы выделения воды за это время составляют $0.75 \cdot 10^{15}$ г/год. По мнению большинства исследователей, на начальных этапах эволюции Земли они были выше, затем снизились в современную эпоху до $0.25 \cdot 10^{15}$ г/год [3].

В настоящее время в поверхностной гидросфере аккумулировано $1.37 \cdot 10^{24}$ г воды. Суммарное количество всех типов подземных вод земной коры составляет $0.531 \cdot 10^{24}$ г [4–6], т.е. меньше половины массы поверхностной гидросферы.

В осадочной оболочке земной коры в современную эпоху содержится $0.195 \cdot 10^{24}$ г воды. Существенно больше воды ($0.336 \cdot 10^{24}$ г) сосредоточено в «гранитной» и «базальтовой» оболочках земной коры [4].

Можно заключить, что на настоящем этапе эволюции Земли масса поверхностной и подземной гидросфер приближается к $2 \cdot 10^{24}$ г, в мантии находится $\sim 1 \cdot 10^{24}$ г и примерно такое же количество воды было диссипировано в мировое пространство.

Важнейшей особенностью подземных вод земной коры является то, что они относятся к ее подвижным компонентам, благодаря постоянному переносу которых практически любая система в пределах земной коры является открытой. Перенос подземных вод в толще земной коры, обусловленный совместным действием солнечной радиации, теплового и гравитационного полей Земли, реализуется в процессе ее эволюции непрерывно (включая ряд циклов), начиная от активного водообмена в верхних частях земной коры, до замедленного – в глубоких. Уточненная и дополненная [5–6] количественная модель системы подземных вод, включающая гидрогеологический, литогенетический и геологический циклы, круговороты воды в пределах земной коры, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Количественные параметры системы подземных вод Земли

Цикл водообмена	Геосфера	Элемент геосферы	Масса воды, г	Массопоток, г/год
Гидрогеологический	Свободные подземные воды	Зона активного водообмена	$1.37 \cdot 10^{21}$	$10.51 \cdot 10^{18}$
		Зона замедленного водообмена	$21.4 \cdot 10^{21}$	$0.66 \cdot 10^{18}$
Литогенно-метаморфический	Связанные воды континентальной и океанической кор	Связанные воды осадочных пород	$108.9 \cdot 10^{21}$	$6.5 \cdot 10^{15}$
		Связанные воды гранитно-метаморфической оболочки	$141 \cdot 10^{21}$	$0.041 \cdot 10^{15}$
		Связанные воды осадков океанов	$63.8 \cdot 10^{21}$	$0.32 \cdot 10^{15}$
		Связанные воды вулканогенного и базальтовых слоев океанической коры	$195 \cdot 10^{21}$	$0.98 \cdot 10^{15}$
Геологический	Термальные воды рифтовых систем			$1 \cdot 10^{18}$
	Зона перехода от океана к континенту	Вулканические извержения		$0.115 \cdot 10^{15}$
		Парогидротермы		$4.0 \cdot 10^{15}$
Свободные воды верхней части земной коры			$22.77 \cdot 10^{21}$	$11.17 \cdot 10^{18}$
Связанные воды земной коры			$0.509 \cdot 10^{24}$	$7.84 \cdot 10^{15}$
Связанные воды верхней мантии			$0.95 \cdot 10^{24}$	$0.38 \cdot 10^{15}$
Подземные воды земной коры и верхней мантии			$1.461 \cdot 10^{24}$	

Эта модель включает:

– гидрогеологические массопотоки свободных гравитационных подземных вод зоны активного и замедленного водообмена в пределах континентального блока земной коры, полностью контролирующие современные экзогенные процессы;

– литогенно-метаморфические массопотоки подземных вод в пределах континентального и субконтинентального блоков земной коры, обусловленные освобождением в основном физически связанных вод глинистых толщ (при их погружении и уплотнении в процессе литогенеза), а также последовательными процессами гидратации пород, переносом химически связанной воды вместе с горными породами и дегидратацией последних (по мере погружения в ходе регионального метаморфизма);

– геологические и литосферно-мантийные массопотоки подземных вод в пределах океанической коры, реализующиеся в зонах ее сопряжения с островными дугами и активными континентальными окраинами в процессе субдукции (эти потоки формируются физически связанными водами I сейсмического осадочного слоя океанической коры и химически связанными водами II вулканогенного и III базальтового слоев океанической коры).

Геологическая роль свободных, физически и химически связанных вод, затягиваемых в процессе дрейфа литосферных плит и субдукции под континентальную кору (геологического круговорота подземных вод, суммарный массопоток которых составляет $0.975 \cdot 10^{15}$ г/год), очень велика. Они образуют гидротермальные системы, участвуют в вулканических извержениях и формируют нисходящий поток воды, достигающий низов земной коры и верхней мантии, равный $\sim 0.38 \cdot 10^{15}$ г/год.

И.Д. Рябчиков [2] подчеркивает большое значение глубоких ветвей (до 400 км) геологического круговорота, которые могут достигать переходной зоны и контролировать начало плавления мантийных пород.

Особое место занимают гидротермальные циркуляционные системы рифтовых зон срединных океанических хребтов. Массопотоки нисходящей и восходящей ветвей этих систем, по данным разных исследователей, оцениваются примерно в 10^{18} г/год.

Исходя из общности происхождения планет земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс), справедливо допустить, что начальные содержания воды в них были пропорциональны их массам. Разогрев недр планет и внутренняя дифференциация их

вещества сопровождалась дегазацией летучих, темпы и масштабы которой существенно отличались, что, в свою очередь, определило особенности распределения и эволюции воды на данных планетах земной группы. Общим для них (за исключением Земли) является крайне низкое содержание, практически полное отсутствие воды в атмосферах и на поверхности.

На Меркурии и Луне атмосфера и гидросферы полностью отсутствуют. На Венере, по мере ее дегазации, формировалась атмосфера, состоявшая из углекислого газа, гелия и паров воды. Последние, будучи легче, попадали в верхние слои атмосферы, под действием солнечного света диссоциировали на ОН и Н. Последний вместе с гелием покидали планету, способствуя формированию углекислой атмосферы.

В атмосфере, на поверхности и в приповерхностных частях Марса в настоящее время присутствуют объемы воды, составляющие лишь незначительную часть от ее первоначальной массы. Это позволяет допускать существование на Марсе поверхностной гидросферы и океанов. Предполагается, что атмосфера на Марсе, существовавшая в условиях теплого влажного климата, на рубеже 4.1–3.8 млрд лет назад была разрушена и потеряла большую часть поверхностной гидросферы. Современные проявления воды на Марсе – это реально существующие ледяные шапки на полюсах. По приближенной оценке, масса воды во льдах на поверхности и в приповерхностных частях Марса может составить примерно $1.2 \cdot 10^{21}$ г, это примерно на три порядка меньше, чем на Земле.

Распределение воды на планетах земной группы свидетельствует о том, что большая ее часть дегазировала. Можно допустить, что содержание воды в их мантиях соответствует значениям, характерным для деплетированной мантии Земли, и пропорционально массам планет. Исходя из этого, рассчитанные, сугубо ориентировочные массы воды в их толщах приведены в табл. 2.

Резко отличается по этим показателям Земля, температурный режим которой позволяет вот уже более 3 млрд лет существовать поверхностной гидросфере и мощным круговоротам воды, захватывающим земную кору и верхнюю мантию. Вулканическая активность на Земле происходит в течение всей ее истории и, в отличие от других планет, на ней реализуются процессы плейтектоники: рифтинг, дрейф литосферных плит и субдукция.

Время существования и особенности развития вулканизма, отсутствие дрейфа литосферных плит позволяют заключить, что количество и особенности распределения

Таблица 2

Характеристики планет земной группы

Параметры	Меркурий	Венера	Земля	Марс
Масса, 10^{27} г	$3.302 \cdot 10^{-1}$	4.8685	5.974	$6.418 \cdot 10^{-1}$
Плотность, г/см ³	5.427	5.24	5.514	3.94
Температура поверхности, °К	100/700	735	185/331	186/268
Вулканическая деятельность, 10^9 лет тому назад	до ~3.5	до 1.0–0.5	до настоящего времени	до 1.0–2.0
Дрейф литосферных плит, 10^9 лет тому назад	не было	не было	с 2.5	не было
Существование поверхностной гидросферы, 10^9 лет тому назад	не было	не было	с 3.0	4.1–3.5
Начальная масса воды, 10^{24} г	0.2-0.32	2.9-4.3.	3.6-5.4	0.38-0.57
Современная масса воды, 10^{24} г	$<10^{-5}$	>0.8	~3.0	~0.0012
Масса воды в толще планеты, 10^{24} г	$<10^{-5}$	~0.8	~1.8	~0.1

воды на планете могут в определенной мере служить причиной, ограничивающей возможность реализации этих процессов. Действительно, вулканизм на Меркурии, Венере, Марсе и Луне развивался только в первые миллиарды лет после их образования, пока недра планет содержали массы воды, достаточные для поддержания необходимых физических условий для образования магм. По мере дегазации вулканизм на Меркурии, Венере и Марсе повсеместно постепенно затухал. Причем, чем больше было воды, тем дольше он продолжался. На этих планетах не существует процессов рифтинга и субдукции, которые определяют тектонику плит и для реализации которых необходимо постоянное участие определенных масс воды (поступающих из поверхностной гидросферы и водосодержащих горных пород океанической коры в зоны погружения плит для поддержания физических параметров горных пород, необходимых для конвекции в верхней мантии).

На Земле, в срединно-океанических хребтах, поступление воды в зону образования магм осуществляется в результате гидротермальной конвекции непосредственно из океанических вод. В зонах субдукции за поступление воды ответственны геологический, литосферно-мантийный массопотоки и круговорот подземных вод океанической коры (табл. 3).

Таблица 3

Массопотоки геологического круговорота подземных вод за 2.5 млрд лет

Составляющие массопотока	За 2.5 млрд лет (10^{24} г)
Гидротермы	2.000
Вулканические извержения	0.29
Нисходящий поток	0.947
Полный массопоток	3.237

В результате этого физически связанные воды осадочного и вулканогенно-осадочного слоев океанической коры погружаются под континентальную кору и, переходя в свободное состояние, участвуют в формировании гидротерм, в вулканизме островных дуг и активных континентальных окраин. Химически связанные воды базальтового слоя океанической коры в ходе дрейфа литосферных плит и субдукции поступают в глубокие слои земной коры и верхнюю мантию [7], где они переходят в свободное состояние, перманентно поддерживают необходимые физические параметры горных пород и магматических расплавов, необходимые для конвекции в верхней мантии. В.П. Трубицын [8] отмечает, что влияние воды на вязкость вещества сравнимо с влиянием температуры.

На Земле процессы рифтогенеза, дрейфа литосферных плит и субдукции начались порядка 2.5 млрд лет назад, после возникновения океанов и одновременно с образованием гидратированных осадочных и вулканогенных пород океанической коры. Масса воды, поступившая в нижнюю часть земной коры и верхнюю мантию за время существования геологического круговорота подземных вод и реализации дрейфа литосферных плит, составляет $0.947 \cdot 10^{24}$ г (табл. 4), что соизмеримо с массой воды, содержащейся в мантии ($1 \cdot 10^{24}$ г) и диссипированной в космическое пространство.

Таблица 4

Массы воды, участвующие в дегазации мантии

Параметры гидросферы	Масса воды, 10^{24} г
Содержание воды в деплетированной и дегазированной верхней мантии	~ 1
Масса воды, диссипированной за пределы Земли	~ 1
Нисходящий массопоток геологического круговорота подземных вод за 2.5 млрд лет	0.95

Вышеизложенное дает основание предположить, что геологический круговорот подземных вод океанического блока земной коры, в свою очередь связанный с процессами тектоники плит, является механизмом, компенсирующим дегидратацию

мантии и поддерживающим содержание воды в ней на уровне, достаточном для ее конвекции и реализации тектонической активности Земли в течение длительного периода, вплоть до настоящего времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wanke H., Dreibus G.* Chemical composition and accretion history of terrestrial planets // *Philosophical transactions of the Royal Soc. A.* 1988. July. Vol. 325. Issue: 1587. – Режим доступа: <http://www.rsta.royal.societypublishing.org>
2. *Рябчиков И.Д.* Флюидный режим мантии Земли // *Вестник ОГГГГН РАН.* 1999. № 3(9). С. 141–153.
3. *Сорохтин О.Г.* Жизнь Земли. М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. 452 с.
4. *Зверев В.П.* Подземные воды земной коры и геологические процессы. 2-е изд. М.: Научный мир, 2007. 256 с.
5. *Зверев В.П.* Подземная гидросфера. Проблемы фундаментальной гидрогеологии. М.: Научный мир, 2011. 260 с.
6. *Зверев В.П.* Система природных вод Земли. М: Научный мир, 2013. 312 с.
7. *Файф У., Прайс Н., Томпсон А.* Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. 436 с.
8. *Трубицын В.П.* Единая глобальная эволюционная тектоника Марса, Земли и Венеры и этапы тектонической эволюции континентов на Земле // *Эволюция тектонических процессов в истории Земли: Материалы XXXVII Тектонич. совещ.* Новосибирск, 2004. С. 220–223.