



УДК 523.681

## Термодинамическая эволюция Земли и Марса с образованием океана, свободного атмосферного кислорода и возникновением жизни

Р.Я. Белевцев<sup>1</sup>, К.И. Чурюмов<sup>2</sup>, С.Д. Спивак<sup>1</sup>, Е.К. Мельник<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии и окружающей среды НАН Украины

<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

<sup>3</sup>Киевский лицей «Диалог»

*На основании анализа геохимических и космогонических данных о термических параметрах во внешних геосферах и эруптивных процессах формирования планетных тел звездной природы в Солнечной системе (по В.А.Амбарцумяну и С.К.Всехсвятскому) обоснованы новые идеи о происхождении и термодинамической эволюции внешних сфер Земли и Марса с образованием кислого океана, свободного атмосферного кислорода и возникновением жизни.*

*ТЕРМОДИНАМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ ЗЕМЛІ ТА МАРСА З УТВОРЕННЯМ ОКЕАНУ, ВІЛЬНОГО АТМОСФЕРНОГО КИСНЮ ТА ВИНИКНЕННЯМ ЖИТТЯ, Белевцев Р.Я., Чурюмов К.І., Спивак С.Д., Мельник О.К. — На підставі аналізу геохімічних і космогонічних даних про термічні параметри у зовнішніх геосферах і еруптивні процесах формування планетних тіл зоряної природи в Сонячній системі (по В.А.Амбарцумяну і С.К.Всехсвятському) обґрунтовані нові ідеї про походження і термодинамічну еволюцію зовнішніх сфер Землі та Марса з утворенням кислого океану, вільного атмосферного кисню і виникненням життя.*

*THERMODYNAMICAL EVOLUTION OF THE EARTH AND MARS WITH FORMATION OF OCEAN, FREE ATMOSPHERIC OXYGEN AND GENERATION OF LIFE, by Belevtsev R.Ya., Churyumov K.I., Spivak S.D., Melnik E.K. — On the basis of geochemical analysis and cosmogonics data of thermal parameters of external geosphere and eruptive process generating planetary bodies of stellar nature in the Solar system (by V.A.Ambartsumyan and S.K.Vsehsyatsky) were founded new ideas about origin and thermodynamic evolution of exospheres of the Earth and Mars with formation of the acidic ocean, free atmospheric oxygen and generation of life.*

**Ключевые слова:** планета; Земля; Марс; эволюция; океан; кислород; жизнь.

**Key words:** planet; the Earth; Mars; evolution; ocean; oxygen; life.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Восстановление эволюции планет Солнечной системы, в частности Земли и Марса, является достаточно сложной проблемой, поскольку имеется мало данных наблюдений о подобных процессах и основным подходом исследователей является метод аналогий этой эволюции с современными процессами на Земле, что соответствует уровню знаний авторов гипотез и далеко не всегда обосновано термодинамически.

В этом отношении наибольшие противоречия среди геологов возникают между непутистами и плутонистами, а среди астрофизиков — между сторонниками аккреции рассеянного и холодного вещества газовой-пылевой туманности до образования планет и сторонниками эруптивного генезиса планет и малых тел, формирующихся в результате взрыва звезд. Непутисты и сторонники аккреции опираются на очевидные наблюдения за современными процессами осадконакопления и падения метеоритов на Землю. Плутонисты и сторонники взрывов во Вселенной исходят из превалирующего развития магматических процессов в ранние стадии формирования Земли и из наблюдаемых взрывов звезд с образованием туманностей. Сторонники аккреции высказали целый ряд классических космогонических гипотез с XVII века и поныне и эти представления являются практически общепринятыми. Сторонники эруптивной гипотезы в основном используют данные конкретных и многочисленных наблюдений за явлениями в космосе. Это прежде всего В.А.Амбарцумян, С.К.Всехсвятский и другие [1, 7]. Задача настоящей работы состоит в том, чтобы на основе термодинамического анализа высказанных космогонических гипотез и собственных данных о геологии и геохимии геосфер обосновать термодинамическую эволюцию Земли и Марса.

### 2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОИСХОЖДЕНИИ ПЛАНЕТ

Классические гипотезы о происхождении Солнца и планет Декарта, Канта и Лапласа (XVII–XIX веков) и более современные Вейцекера, Койпера, Хойла, Шмидта и других исходили из идеи формирования планет и даже Солнца из диффузного газовой-пылевого вещества туманности. Эти гипотезы

можно назвать механическими [1, 7], поскольку согласно им в результате гравитационной неустойчивости имели место турбулентные движения с вихрями, образовалась система колец с конденсацией (аккрецией) диффузного вещества в планеты, астероиды, метеориты, кометы и другие малые тела Солнечной системы. Разогрев планет происходил только радиоактивным теплом, хотя некоторые исследователи допускают даже аккреционный генезис Солнца. Многие же считают, что планеты никогда не были расплавленными (Шмидт). Как следствие этих представлений, многие геологи, геохимики и геофизики переносят современные физико-химические условия на Земле в глубину геологической истории, вплоть до возникновения планеты. Они считают, что уже в раннем архее с 3,8 млрд. лет назад отлагались морские железисто-кремнистые осадки с участием анаэробных бактерий [12]. По этим нептунистическим и актуалистическим представлениям, физические условия на земной поверхности в то время были близки к современным — с нормальной температурой, со слабощелочной водой в океане и с жизнью в архейских морях. Эти представления противоречат огромному петрологическому и геохимическому материалу о преобладании в раннедокембрийской земной коре и мантии глубинного магматизма, и поэтому их следует отнести к чисто умозрительным.

### **3. ПРОТИВОРЕЧИВОСТЬ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПРОИСХОЖДЕНИИ ПЛАНЕТ**

Астрофизические наблюдения свидетельствуют о том, что в нашей Галактике характерен распад звезд с рассеянием вещества в газово-пылевые туманности, согласно второму правилу термодинамики. Обратный процесс — не наблюдается [1, 7]. Земля и другие планеты обязательно проходили стадию сильного нагрева и расплавления, особенно в ранние стадии развития. Внутренние сферы многих даже небольших планетных тел (Титана, Тритона, Луны и др.) характеризуются высокими температурами и значительными тепловыми потоками. Основной чертой развития планетных систем является эруптивное образование малых тел, которое происходит и сейчас. Кольца метеоритного материала имеются и у Земли, подобно Сатурну. Планеты и малые тела Солнечной системы имеют звездную природу, и чем больше тело, тем большая у него начальная энергия и меньшие потери массы в процессе эволюции.

Изменение плотности (от 1,3 г/см<sup>3</sup> у звездной материи), радиуса и массы при эруптивной эволюции от протопланет до современного состояния следующие [7]. Для Земли плотность увеличилась в 4 раза, радиус уменьшился в 2–10 раз (в среднем в 3 раза), а масса уменьшилась в 5–80 раз (в среднем в 20 раз). Плотность Марса увеличилась от прото-Марса в 3 раза, радиус уменьшился в 3 раза, масса уменьшилась в 15 раз.

Солнце могло быть компонентом двойной звездной системы, после того как второй компонент разделился на планетные тела в результате взрыва. Эти тела теряют массу — водород, гелий и другие легкие элементы, и увеличивается их плотность [1, 7]. Чем больше плотность планеты, тем более активные эруптивные процессы проходили в процессе ее эволюции. Одними из результатов последней являются атмосферы планет, которые имеют ювенильное происхождение, и пополнение межзвездного пространства газом, пылью, метеоритами, кометами. Внутреннее строение планет характеризуется зональностью с выделением оболочек, что возможно лишь при активных процессах магматической дифференциации и газовой выделении. О магматическом состоянии недр Луны и Земли в катархее также можно судить по сжатию тел этих планет с полюсов и по смещению центра тяжести Луны к Земле из-за притяжения к последней [8], что было возможно лишь при расплавленном состоянии недр Луны и благодаря чему к Земле всегда обращена только одна сторона Луны.

Изотопный возраст Земли и других планет и метеоритов одинаков — 4,5 млрд. лет, что противоречит образованию этих тел из туманности. Тяжелые элементы образуются только в звездах при реакциях ядерного синтеза в условиях весьма высоких РТ параметрах. Поэтому звездное вещество — первично, а вещество туманностей — вторично.

Надо отметить, что рассеяние вещества в космическом пространстве является самопроизвольным устойчивым процессом, поскольку происходит с увеличением энтропии системы. Напротив, аккреция может идти только с затратой значительной дополнительной свободной энергии, с уменьшением энтропии и вероятности (устойчивости) системы [2, 4, 5], что свидетельствует о невозможности образования планетных тел путем аккреции вещества газово-пылевой туманности.

Тяжелые элементы образуются только в звездах при реакциях ядерного синтеза в условиях весьма высоких РТ параметров с выделением огромной энергии и поэтому они весьма устойчивы и имеют большие энергии связи, причем минимальной энергией связи обладает водород, как исходный материал ядерного синтеза, а максимальная энергия связи у кислорода, силиция и магния и особенно у железа [1, 6, 7, 11, 14, 18].

Аккреции также препятствует «солнечный ветер», т.е. электромагнитное и электрон-нейтронные потоки из Солнца и других звезд [1]. Кроме того, под влиянием этого излучения частицы твердого вещества (от пылинок до метеоритов и астероидов) в космосе все время вращаются вокруг своего центра тяжести [20], причем скорость вращения обратно пропорциональна размеру космических тел. Скорость

вращения астероида — один оборот за 8 часов, а метеорита с диаметром 0,1 м — один оборот за 2 секунды.

#### 4. ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМЛИ. ТЕПЛОГЕНЕРАЦИЯ И СОСТАВ ВНЕШНИХ ГЕОСФЕР

Таким образом, по гипотезе С.К. Всехсвятского [7], Земля в результате эруптивных процессов в ранние стадии эволюции превратилась из звездного вещества в магматическое тело, стратифицированное по плотности, составу и температуре. По нашим данным, в раннем докембрии состав магматических геосфер был близок к современному, кроме растворенных в магме газов, главным из которых была вода [2]. В раннем архее коровые плагииграниты были интродуцированы высокотемпературными (порядка 2000°C) железисто-кремнистыми магмами с глубины 50–100 км [2, 4, 5]. Теплогенерация при формировании гранитоидной земной коры связана с распадом радионуклидов, остыванием коры, выделением тепла кристаллизации магмы, уплотнением земной коры и мантии при кристаллизации магмосфер и газовыделении, что ведет к уменьшению объема и радиуса Земли и выделением гравитационной энергии [9]. Приближенный расчет этой гравитационной энергии в архее составил  $E = 3 - 4 \cdot 10^{30}$  Дж, а радиус Земли уменьшился примерно на 60–100 км. Суммарная выделенная Землей энергия в архее составила около  $10^{31}$  Дж или  $10^{22}$  Дж/год. Это примерно на порядок больше, нежели современный тепловой поток с поверхности Земли —  $10^{21}$  Дж/год [2–7, 9, 10, 16, 18].

#### 5. РЕЖИМ ТЕМПЕРАТУРЫ В ГЕОСФЕРАХ

Температура земной поверхности при кристаллизации коровой плагиигранитной магмы 3,8 млрд. лет назад была 750–800°C и постепенно опустилась до нормальной температуры при литогенезе рифейских овручских кварцитов в кислом океане 1,3–1,0 м. л. назад [2–5]. Критическая температура земной поверхности достигла критической температуры воды 375°C примерно 2,8 млрд. лет назад (рис. 1).

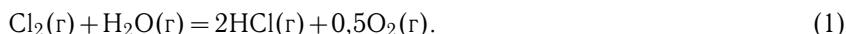
#### 6. ГАЗОВОДНАЯ АТМОСФЕРА В АРХЕЕ

В архее поверхность земной коры была покрыта высокотемпературной газовой атмосферой с  $T = 80^\circ - 375^\circ\text{C}$ . Теплоперенос в архейской, газовой атмосфере слабее, чем через породы. Тепловыделение, теплопроводность и теплоперенос через граниты и газоводную атмосферу охарактеризованы в работах [4, 5, 13, 19].

#### 7. ФОРМИРОВАНИЕ КИСЛОГО ОКЕАНА И СВОБОДНОГО КИСЛОРОДА В ПРОТЕРОЗОЕ

При температуре поверхности Земли ниже критической температуры воды 375°C (и критическом  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 220$  бар) газоводная атмосфера Земли конденсировалась в жидкую воду и в течение протерозоя превратилась в океан (рис. 1, 2). При достижении земной поверхности нормальной температуры (25°C) средняя глубина океана 1,7–1,3 млрд. лет назад составила 2000 м.

Реакции между хлором и водой зависят от температуры. При высоких температурах, выше  $T = 375^\circ\text{C}$  — критической температуры воды, когда она существует в виде газа, протекает реакция (1), которая идет налево (рис. 2а):



Но при температуре ниже критической при появлении жидкой воды осуществляется реакция (2), которая идет вправо (рис. 2а):

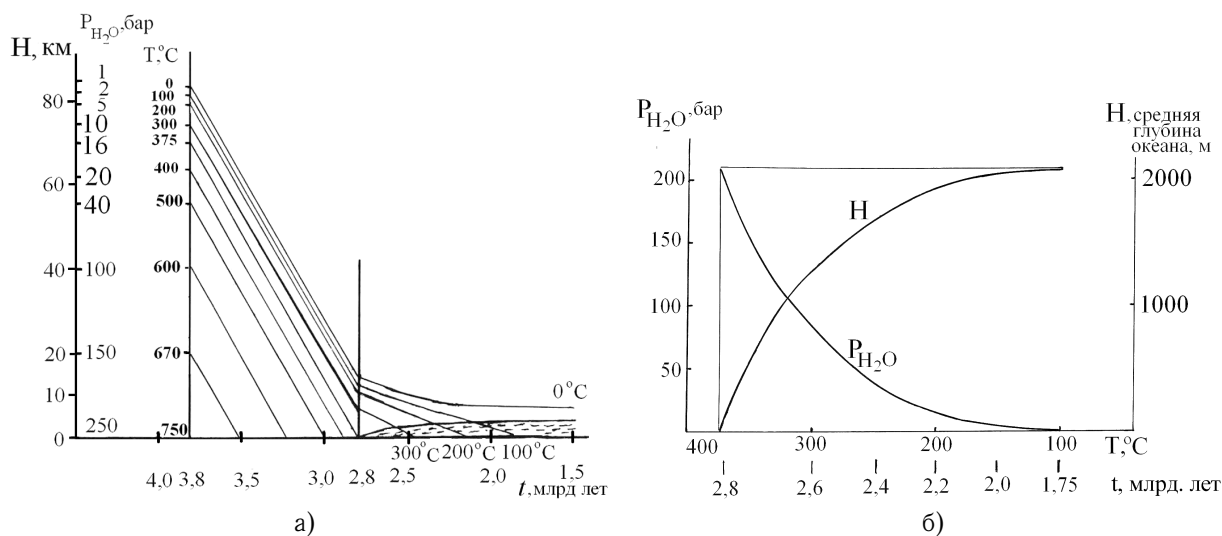
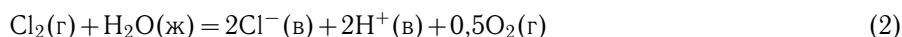


Рис. 1. Зависимость высоты (H, км),  $P_{\text{H}_2\text{O}}$ , и температуры (T) докембрийской газовой атмосферы (а), а также глубины протерозойского океана (H, м) от возраста (t) (б)

где (г) — газ, (ж) — жидкость, (в) — в водном растворе. При этом ионы  $\text{Cl}^-$  (в) и  $\text{H}^+$  (в) образуют водный раствор соляной кислоты —  $\text{HCl}$ (в). По этой реакции образуется кислый океан с  $\text{pH}=0,15$  и свободный атмосферный кислород [3]. Прохождению реакции (2) и выделению свободного кислорода способствуют: уменьшение  $T$ , рост  $P_{\text{общ}}$ , уменьшение восстановимости и кислотности водных растворов, уменьшение  $P_{\text{H}_2}$ . При этом  $P_{\text{O}_2}$  в раннепротерозойской атмосфере достигает 1 бар (рис. 1–2).

Так в раннем протерозое появился кислый океан и абиогенная богатая кислородом атмосфера, которая определила Eh океанической воды около  $+0,8 \text{ В}$  [3]. В криворожских железисто-кремнистых формациях в раннем протерозое происходило образование богатых железных руд, а в позднем протерозое (1,8–1,85 млрд. лет назад) инфильтрационных урановых месторождений, что возможно лишь при окислительных условиях и подтверждается наличием в породах и рудах гематита и  $^{34}\text{S}$  [15] (рис. 2).

Первые осадки в виде кварцито-песчаников отложились в нижнем рифее 1,6–1,3 млрд. лет назад при размыве первой суши, сложенной гранитоидами, поскольку кислая вода океана выщелачивала из них все катионы, а устойчивым остаточным продуктом этого литогенеза был кремнезем [3]. И только в верхнем рифее 1,2–1,0 млрд. лет назад в результате этого литогенеза вода океана была нейтрализована и появилась возможность отложения известняков и возникновение жизни.

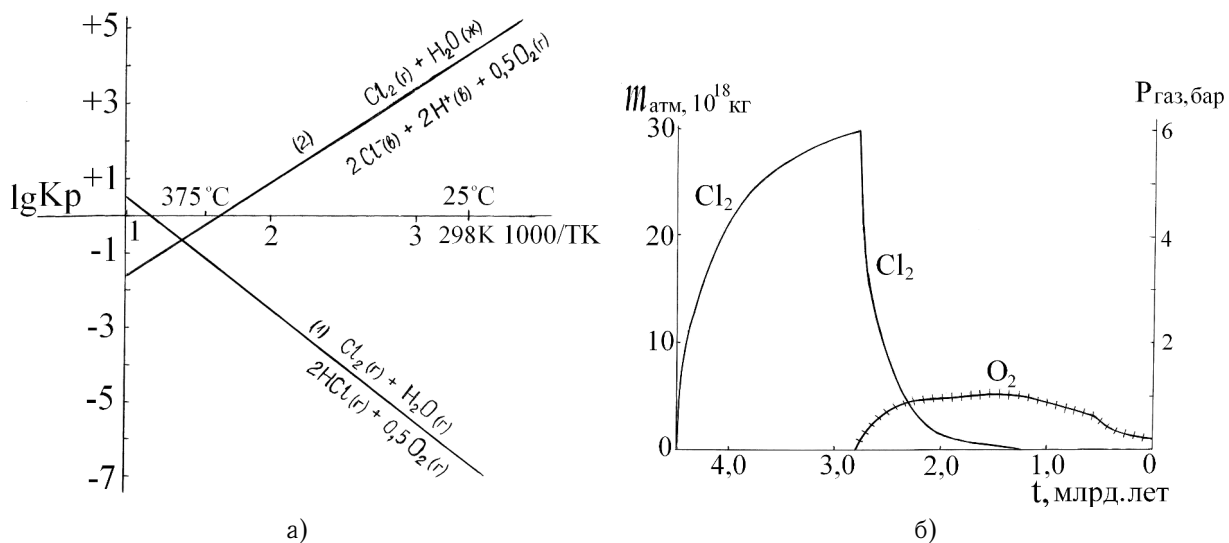
## 8. ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОСФЕР В ФАНЕРОЗОЕ И ТЕКТОНИКА ПЛИТ

До рифея океан представлял собой сплошную геосферу видимо из-за низкой вязкости частично расплавленных мантийных геосфер. В рифее появляется первая суша, а в фанерозое росли скорости горизонтальных надвиговых движений блоков коры в связи с активизацией тектоники плит [3–5]. Углубление дна океанов до 5–6 км и более отражает тенденцию выделения гравитационной энергии Земли за счет уменьшения ее радиуса. За фанерозой радиус Земли уменьшился примерно на 2–3 км, что равносильно выделению гравитационной энергии около  $10^{29}$  Дж, а скорость тепловыделения составила  $2 \cdot 10^{20}$  Дж/год, что соответствует 20% теплового потока из недр планеты. Если учесть, что активность тектоники плит возросла с кембрия по ныне в 5 раз [4, 5, 13, 15], то можно предположить, что сейчас 50–70% энерговыделения из недр Земли дает тектоника плит и ее вклад в этот процесс все время увеличивается. Это сопровождается нарастающим со временем гравитационным энерговыделением из недр Земли в виде землетрясений, вулканизма, метаморфизма в подвижных зонах и теплотока через геосферы.

Выгорание атмосферного кислорода при сжигании углеводородного топлива в техносфере весьма значительно. Сейчас добыча нефти и газа составляет около  $12 \cdot 10^{12}$  кг в год, а при сжигании этого топлива используется около  $30 \cdot 10^{12}$  кг атмосферного кислорода [5]. Такие темпы развития углеводородной энергетики приведут к тому, что половина кислорода земной атмосферы выгорит за 300–350 лет, а это будет означать коллапс человечества и значительной части биосферы.

## 9. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ

Как известно, белок живых организмов неустойчив при температуре более  $60^\circ\text{C}$ , а для бактерий граничные условия кислотности составляют  $\text{pH}=2-3$  [4, 5]. Считается, что жизнь зародилась в архейском океане в виде анаэробных фотосинтезирующих простейших в условиях, близких к современным тропическим зонам. Однако, как показали проведенные исследования, в архее и раннем протерозое температура



**Рис. 2.** Образование свободного кислорода по реакции между между хлором и водой (а), а также изменение массы и парциального давления газов — хлора ( $\text{Cl}_2$ ) и кислорода ( $\text{O}_2$ ) в атмосфере Земли (б)

на поверхности Земли была намного выше  $100^{\circ}\text{C}$ , что неблагоприятно для возникновения жизни (рис. 1, 2). Более того, океан возник лишь в раннем протерозое и до верхнего рифея имел сильно кислую реакцию ( $\text{pH}$  около 0,15), которая также неблагоприятна для жизни. Свободный атмосферный кислород образовался еще в раннем протерозое абиогенным путем.

Таким образом, аэробная жизнь возникла в верхнем рифее 1200–1000 млн. лет назад, когда в океане появились для нее благоприятные условия: нормальная температура,  $\text{pH} = 7 - 8$  и кислородная атмосфера [3–5]. Совпали эти условия благодаря остыванию земной коры, образованию атмосферного кислорода, тектонике плит и осадконакоплению в нижнем рифее.

## 10. ЭВОЛЮЦИЯ МАРСА

На планете Марс должна проявиться подобная земной эволюция внешних сфер в раннем докембрии. Видимо красный цвет поверхности планеты Марс связан с гематитом, который образовался при окислении пород Марса в ранний постмагматический этап развития планеты, когда на Марсе появился кислый океан и кислородная атмосфера по земной схеме [3–5, 17].

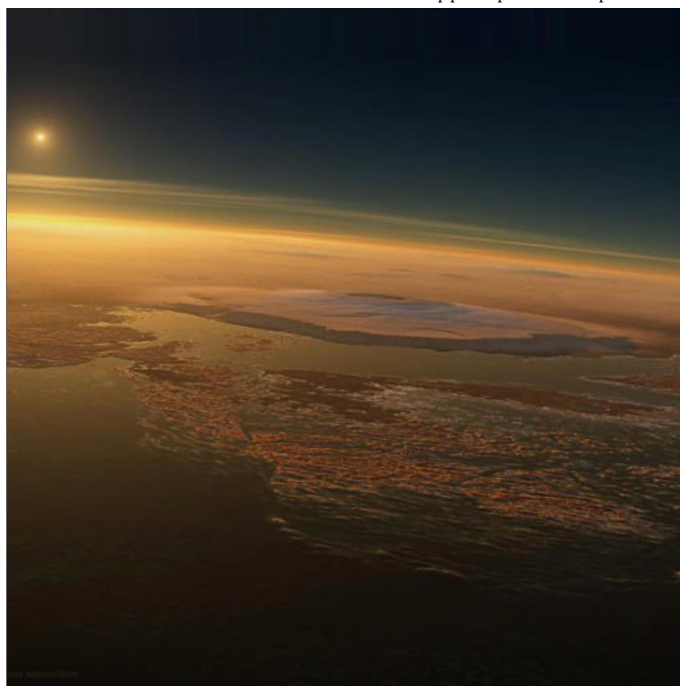
Параметры атмосферы Марса: давление 7 мбар, в составе преобладает  $\text{CO}_2$ , температура днем на экваторе до  $+20^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 3.** Красный овручский рифейский кварцит (возраст 1,3 млрд. лет) с морской рябью (размер образца 15 см из карьера) как аналог красных песков на планете Марс — см. на рис. 4.



**Рис. 4.** Фотография ручьев, размывающих морскую осадочную толщу желто-красных песков на планете Марс. Вероятно, пески кварцевые, красный цвет их определяет гематит, а охристо-желтый — лимонит. Фото с космического американского аппарата. Размер снятой территории по горизонтали около 100 км.



**Рис. 5.** Гора Олимп в архейском океане (около 4,0–3,0 млрд. лет назад) с Солнцем на горизонте

Ориентировочный возраст этих процессов на Марсе — 4,2–3,0 млрд. лет назад, поскольку отношение масса/площадь поверхности и отношение скоростей убегания у Марса в 2,4 раза меньше, чем у Земли и, соответственно, остывание Марса шло во столько же раз быстрее, чем Земли. Магматический этап планеты Марс закончился 4,2–4,0 млрд. лет назад, когда марсианская кора закристаллизовалась и имела температуру постмагматической газовой атмосферы около 800°C с давлением воды  $P_{H_2O} = 30–100$  бар и давлением хлора  $P_{Cl_2} = 1–2$  бара. Поверхность Марса остыла до критической температуры воды 375°C примерно 4,0–3,8 млрд. лет назад, когда началась конденсироваться жидкая вода, образовался кислый океан (глубиной 300–700 м) с осадочными толщами кварцевых песков (рис. 4), и свободный атмосферный кислород при  $P_{атм} = 0,5–1$  бар и  $P_{O_2} = 0,1–0,3$  бар. Температура воды в океане упала до 60°C и создались условия для возникновения жизни в океане 3,5–3,0 млрд. лет назад. Учитывая активную тектонику плит на Марсе (горный массив «Олимп» высотой 27 км), которая увеличивала энерговыделение из недр Марса и тепловой поток к поверхности марсианской коры, можно оценить длительность благоприятного для жизни периода на планете Марс до замерзания его поверхности в 200–500 млн. лет. Видимо, за это время возможна лишь небольшая эволюция жизни на Марсе, которая не вышла за пределы простейших организмов. Конечно, надо учитывать некоторые неблагоприятные условия для образования океана, атмосферного кислорода и жизни на Марсе (4,0–3,0 млрд. лет назад) из-за гигантски активной метеоритной бомбардировке в раннем архее (4,4–3,8 млрд. лет назад), а также слабого потока солнечной энергии на поверхность планеты, который препятствует прежде всего эволюции фитобактерий. Впрочем, об этом можно будет судить лишь при детальном обследовании замерзшей гидросферы планеты Марс космическими аппаратами. На планете Марс также имеются значительные перспективы поисков месторождений золота и урана по подобной к земной генетическим моделям в раннем докембрии [3–5].

1. Амбарцумян В.А. Нестационарные объекты во Вселенной и их значение для исследования происхождения и эволюции небесных тел / Проблемы современной космогонии, под ред. В.А.Амбарцумяна. — М.: Наука, 1972. — С. 5–18.
2. Белевцев Р.Я., Бойченко С.Г., Спивак С.Д. и др. Термодинамика газового обмена в окружающей среде. — Киев: Наукова думка, 2007. — 247 с.
3. Белевцев Р.Я., Шестопалов В.М., Спивак С.Д. и др. Геохимия литогенеза овручских кварцито-песчаников рифея // Пошукова та екологічна геохімія. — 2010. — № 1 (10). — С. 22–41.
4. Белевцев Р.Я. Происхождение и эволюция внешних геосфер: газовой атмосферы, кислого океана, свободного атмосферного кислорода и возникновение жизни // Доповіді НАН України. — 2011. — № 12. — С. 83–90.
5. Белевцев Р.Я. Генезис и термодинамическая эволюция внешних геосфер // Геофизический журнал НАН Украины. — 2012. — **34**, № 2. — С. 49–59.
6. Войткевич Г.В. Химическая эволюция Солнечной системы. — М.: Наука, 1979. — 174 с.
7. Всехсвятский С.К. Космогония Солнечной системы // Проблемы современной космогонии / Ред. В.А. Амбарцумян. — М.: Наука, 1972. — С. 316–413.
8. Галкин И.Н. Геофизика Луны. — М.: Наука, 1978. — 176 с.
9. Добрецов Н.Л. Введение в глобальную петрологию. — Новосибирск: Наука, 1980. — 200 с.
10. Мархинин Е.К. Вулканизм. — М.: Недра, 1985. — 288 с.
11. Мейсон Б. Основы геохимии. — М.: Недра, 1971. — 311 с.
12. Мельник Ю.П. Физико-химические условия образования докембрийских железистых кварцитов. — Киев: Наукова думка, 1973. — 287 с.
13. Планета Венера (атмосфера, поверхность, внутреннее строение) / Под ред. В.Л. Барсукова, В.П. Волкова. — М.: Наука, 1989. — 482 с.
14. Полинг Л. Общая химия. — М.: Мир, 1974. — 846 с.
15. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдасов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. — М.: Наука, 1990. — 182 с.
16. Соболевич Э.В., Бартницкий Е.Н., Цюнь О.В., Кононенко Л.В. Справочник по изотопной геохимии. — М.: Энергоиздат, 1982. — 220 с.
17. Белевцев Р.Я., Чурюмов К.И., Спивак С.Д. Формирование океана, свободного атмосферного кислорода и возникновение жизни на Земле, Марсе и Луне // САММАС 2011, Book of Abstracts. — Vinnitsia, 2011. — P. 20–21.
18. Эберт Г. Краткий справочник по физике. — М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1963. — 552 с.
19. Carrol M.R., Wyllie P.J. Experimental phase relations in the system tonalite-peridotite-H<sub>2</sub>O at 15 kb; implications for assimilation and differentiation processes near the crust-mantle boundary // J. of Petrology. — 1989. — **30**, № 6. — P. 1351–1382.
20. Pittich E.M., Medvedev Yu.D., Solovaya N.A. Rotation of small particules // САММАС 2011, Book of Abstracts. — Vinnitsia, 2011. — P. 34–35.

Поступила в редакцию 22.10.2012