

УДК 550.46/.47:523.31

Неручев С.Г.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский нефтяной научно-исследовательский геологоразведочный институт» (ФГУП «ВНИГРИ»), Санкт-Петербург, Россия, ins@vniгри.ru

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ ЖИВЫМ ВЕЩЕСТВОМ БИОСФЕРЫ

Рассмотрены основные этапы истории биосферы за 3,5 млрд. лет, показана масштабная планетарная роль живого вещества биосферы в значительном преобразовании планеты Земля – ее земной коры, гидросферы и атмосферы.

Биосфера является сложной саморазвивающейся системой, которая постепенно создавала более благоприятные условия для появления и существования новых более совершенных организмов - высших млекопитающих вплоть до человека. Именно биосфера обеспечила возможность образования озонового экрана, защищающего жизнь от ультрафиолетового излучения Солнца, значительно изменила атмосферу Земли, снизив атмосферное давление от 70 атм. до 1 атм., убрав из нее в земную кору огромную массу двуокиси углерода и повысив в ней концентрацию кислорода до современной, необходимой для дыхания наиболее прогрессивных организмов.

Материалом для обоснования и анализа роли живого вещества биосферы в преобразовании Земли послужили обширные геологические, геохимические и палеобиологические данные.

Ключевые слова: биосфера, живое вещество, атмосфера, гидросфера, органический мир.

Уникальной особенностью планеты Земля является наличие жизни, живого вещества, биосферы, существующей уже 3,5 млрд. лет и значительно изменившей нашу планету.

Проблема происхождения, или появления жизни на Земле пока не имеет строгого обоснованного решения. Поэтому будем исходить из фактов.

В морских отложениях, имеющих возраст около 3,5 млрд. лет, выявлены «спороморфные» тельца и спорополенин, нитеобразные бактерии, сфероидальные сине-зеленые водоросли и строматолиты [Соколов, 1972].

Начался фотосинтез, приводивший к появлению в атмосфере свободного кислорода, но он почти полностью связывался в окислительных реакциях. Появились примитивные эукариоты, многоклеточные водоросли, грибы (фикомицеты), зеленые, а затем и красные и пиррофитовые водоросли [Соколов, 1972].

Биомасса и биопродукция организмов постепенно возрастала. Сейчас ежегодная продукция органического вещества, по последним данным, на суше составляет примерно $1,46 \cdot 10^{11}$ т, а в океане – около $1,48 \cdot 10^{11}$ т [Романкевич, Ветров, Пересыпкин, 2009]. Однако биомасса суши довольно инертна – ее годовая биопродукция составляет всего 4,5%, а в

океане, в основном за счет быстро размножающегося одноклеточного фитопланктона, она достигает 1700%, т.е. почти в 400 раз выше.

С большой осторожностью с использованием двух подходов автором примерно оценена суммарная масса биопродукции – органического вещества, образовавшегося в результате жизнедеятельности за 3,5 млрд. лет. Первый подход основан на использовании величины современной биопродукции. Было принято, что в первый миллиард лет после появления биосферы ее годовая биопродукция в гидросфере не превышала 0,3, во второй миллиард лет 0,5 от современной, а в последние 1,5 млрд. лет достигла современной. Биопродукция суши с начала ее появления в девоне (400 млн. лет) оценена в $0,58 \cdot 10^{20}$ т. Суммарная биопродукция органического вещества оценена в $3,62 \cdot 10^{20}$ т.

Второй подход исходил из оценки накопленной в осадочных породах массы $C_{орг}$ ($10,8 \cdot 10^{15}$ т) с учетом средних окислительных потерь органического вещества в процессе его седиментации, во время аэробного и анаэробного окисления в осадках, а также вследствие термического разложения в процессе катагенеза и метаморфизма в погружающихся осадках. Суммарная биопродукция органического вещества при этом подходе оценена несколько меньше – в $2,74 \cdot 10^{20}$ т.

Если бы органическое вещество после отмирания организмов не окислялось почти полностью, а сохранилось, его объем составил бы примерно $2,7-3,6 \cdot 10^{20}$ м³, а распределенный равномерно по поверхности Земли ($5,1 \cdot 10^8$ км²), образовал бы геосферу толщиной 530–700 км, что эквивалентно 8–10% радиуса Земли.

Суммарная биопродукция органического вещества (безводного) за 3,5 млрд. лет превышает объем гидросферы Земли ($\sim 1,5 \cdot 10^9$ км³), в которой она в основном воспроизводилась, в 180–240 раз. Если учесть, что живое вещество содержит в среднем 30% органического вещества и 70% воды, то получается, что объем воды в суммарной продукции за 3,5 млрд. лет составлял $6,4-8,4 \cdot 10^{20}$ м³, что превышает объем воды в гидросфере примерно в 400–600 раз.

Стало быть, через живое вещество биосферы вся вода гидросферы за 3,5 млрд. лет прошла несколько сотен раз, и на Земле нет ни капли воды, которая бы не была многократно использована живым веществом биосферы.

Помимо O, C, H, N, на которые в составе органического вещества приходится 96,66%, оно содержит в незначительных количествах еще около 60 химических элементов – от Ca (1,38%) до Rn ($n \cdot 10^{-12}\%$). Соответственно за 3,5 млрд. лет живое вещество биосферы изъяло

из гидросферы, а затем вернуло в нее и осадочные породы $5 \cdot 10^{18}$ т Са, $2,3 \cdot 10^{18}$ т К, $0,52 \cdot 10^{18}$ т Р и даже $1,16 \cdot 10^{14}$ т U.

Из этого следует, что процессы жизнедеятельности в биосфере по своим масштабам являются важным планетарным фактором, определяющим многие особенности атмосферы, гидросферы и осадочных пород Земли.

Основой воспроизводства огромных масс живого вещества биосферы является фотосинтез, процесс сложный и, пожалуй, до сих пор еще не полностью изученный. Однако сущность его схематично можно представить следующим образом:

$12\text{CO}_2 + 10 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5) + 12\text{O}_2$, или в еще более упрощенном, но не нарушающем баланса виде: $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{C}_{\text{орг}} + \text{O}_2$.

Стало быть по массам фосилизованного в осадочных породах земной коры $\text{C}_{\text{орг}}$, а такие данные имеются, можно рассчитать исходную массу потребовавшейся для этого CO_2 и массу образовавшегося O_2 . Эти данные с использованием материалов А.Б. Ронина [Романкевич, Ветров, Пересыпкин, 2009] и автора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Баланс углерода и биогенного кислорода

Возраст отложений	$\text{CO}_2_{\text{карб}} \cdot 10^{15}$ т	$\text{CO}_2_{\text{орг}} \cdot 10^{15}$ т	$\Sigma \text{CO}_2_{\text{карб+орг}} \cdot 10^{15}$ т	$\text{C}_{\text{орг}} \cdot 10^{15}$ т	$\text{O}_2 \cdot 10^{15}$ т
Ar – Pt ₂	30,0	4,4	34,4	1,2	3,2
Pt ₃	36,7	2,2	38,9	0,6	1,6
Pz	127,0	11,3	138,3	3,1	8,2
Mz*	102,8	15,78	118,6	4,3	11,5
Rz*	31,3	6,1	37,4	1,7	4,4
	$\Sigma 327,8$	$\Sigma 39,78$	$\Sigma 367,7$	$\Sigma 10,8$	$\Sigma 28,9$

* С учетом I сейсмического слоя океана.

На образование в процессе фотосинтеза имеющейся в осадочных породах массы $\text{C}_{\text{орг}}$ от архея до кайнозоя включительно потребовалось изъять из палеоатмосферы Земли $38,78 \cdot 10^{15}$ т CO_2 , что превосходит массу CO_2 в современной атмосфере в 20 тысяч раз.

Помимо этого огромная масса CO_2 была изъята из палеоатмосферы Земли на образование карбонатных пород. Карбонаты образуются в результате связывания атмосферной CO_2 основаниями, образующимися при выветривании пород:

$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, или через стадию образующихся в воде бикарбонатов: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$.

По массе образовавшихся карбонатов CaCO_3 и $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ можно определить количество связанной из атмосферы CO_2 .

На образование карбонатных пород израсходовано из палеоатмосферы Земли $327,8 \cdot 10^{15}$ т CO_2 (см. табл. 1), что превышает ее массу в современной атмосфере в 160 тысяч раз.

Как известно, значительная часть карбонатных пород имеет биогенный генезис, они образовались в значительной мере за счет карбонатных скелетов разнообразных организмов. Хорошо известны карбонатные породы толщиной до нескольких километров, состоящие из микроскопических раковин фораминифер и других мельчайших организмов, ракушечные известняки, коралловые известняки и т.п.

Таким образом, суммарная масса двуокиси углерода, использованная живым веществом на образование $\text{C}_{\text{орг}}$ и значительной части карбонатных пород, за 3,5 млрд. лет составляет $367,7 \cdot 10^{15}$ т, что превышает массу современной атмосферы Земли в 72 раза. Как видно, живое вещество биосферы является мощным фактором преобразования нашей планеты.

Итак, известна масса CO_2 , которая изъята живым веществом биосферы за время ее существования из палеоатмосферы Земли ($367,7 \cdot 10^{15}$ т).

Масса азота, находящаяся сейчас почти полностью в атмосфере и в небольшом количестве в гидросфере, а также в составе ископаемого органического вещества (1–1,5%) и нитратов (селитр), также биогенных образований, составляют около $4 \cdot 10^{15}$ т. Присутствие когда-либо в атмосфере ощутимых количеств связанного азота в виде NH_3 мало реально, так как время существования аммиака в атмосфере чрезвычайно мало, он быстро разлагается под действием ультрафиолетового излучения Солнца. То же самое касается и возможности существования в атмосфере ощутимых масс сероводорода (H_2S). Масса аргона и других инертных газов столь незначительна, что ею можно пренебречь.

Масса кислорода, образовавшаяся в процессе фотосинтеза на последовательных этапах развития биосферы, оценена в $28,9 \cdot 10^{15}$ т, причем ее большая часть (~ 95%) израсходована на процессы окисления органического вещества и минеральных веществ, а в современной атмосфере осталось не более 5% от образовавшегося количества кислорода.

Таким образом, имеются все необходимые данные для определения состава газов атмосферы и атмосферного давления на время появления жизни (3,5 млрд. лет), на начало рифейской эпохи (1,6 млрд. лет), на начало палеозоя (0,57 млрд. лет), начало мезозоя (240 млн. лет), на начало кайнозоя (65 млн. лет) и на конец кайнозоя (0 млн. лет).

Однако для проведения таких расчетов необходимо принять ту или иную модель дегазации Земли. Наиболее вероятной является модель дегазации Земли с образованием

гидросферы и атмосферы на первоначальном этапе существования Земли, во всяком случае, до появления жизни (3,5 млрд. лет). Эта наиболее вероятная модель поддерживается большинством исследователей.

Однако из осторожности автор посчитал необходимым параллельно выполнить расчеты и по другой, менее вероятной, но так же возможной модели – более или менее равномерной дегазации Земли за всё время ее существования.

Методика и основные результаты выполненных расчетов впервые были опубликованы в геологической серии известий АН [Давиташвили, 1972], но биологи и другие специалисты, занимающиеся изучением биосферы, о них, возможно, не знают.

По первой модели (табл. 2) масса CO_2 (N_2), имевшаяся в атмосфере на расчетный момент, определялась как разность между их массой, имевшейся в первоначальный момент, и их массой, fossilized в осадках в виде $C_{\text{карб}}$, $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{орг}}$ за время от первоначального до расчетного момента.

По второй модели масса CO_2 (N_2), имевшаяся в атмосфере на расчетный момент, определялась путем суммирования массы CO_2 (N_2), оставшейся в атмосфере в конце предыдущего этапа и поступившей в атмосферу дополнительно за время от предыдущего до расчетного момента за вычетом массы CO_2 (N_2), fossilized в осадках в виде $C_{\text{карб}}$, $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{орг}}$ за то же самое время.

При оценке масс кислорода автор исходил из того, что к настоящему времени в атмосфере в свободном состоянии осталось всего около 5% от его количества, образовавшегося в процессе фотосинтеза за всю историю биосферы, а около 95% оказалось связанным в гидросфере и стратосфере вследствие активно происходивших процессов окисления органического вещества и минеральных компонентов. Это положение принято как справедливое на любой расчетный момент времени. Нет оснований считать, что в геологическом прошлом свободный кислород, когда его было значительно меньше, мог расходоваться на окислительные процессы менее активно, скорее наоборот.

Поскольку CO_2 обладает хорошей растворимостью в воде, на каждый расчетный момент по первой и второй моделям дегазации Земли учтено растворение углекислоты в гидросфере.

Согласно обычным наиболее распространенным представлениям, на первоначальных этапах развития биосферы в атмосфере преобладала двуокись углерода, концентрация кислорода постепенно повышалась вследствие происходившего фотосинтеза, а с девонского времени (400 млн. лет назад) атмосфера уже по своему составу не отличалась от

современной. Почему именно с девонского времени? Наверное, потому, что растительность и первые животные вышли из океана на сушу, а иначе как бы они могли существовать? Что касается атмосферного давления, то о нем вообще никогда и никем не упоминалось, наверное, подразумевалось, что оно всегда было нормальным, равным 1 атм., а изменялся только состав газов.

Таблица 2

Изменение массы и состава атмосферы Земли (в числителе – расчетные параметры атмосферы без учета растворения CO₂ в гидросфере, в знаменателе – с учетом растворения CO₂)

Время, млрд. лет	CO ₂ ·10 ¹⁵ т	N ₂ ·10 ¹⁵ т	O ₂ ·10 ¹⁵ т	ΣCO ₂ +N ₂ +O ₂ ·10 ¹⁵ т	Ратм, атм.	вес. %		
						CO ₂	N ₂	O ₂
I вариант (дегазация Земли на первоначальном этапе)								
3,5	<u>367,7</u>	<u>3,99</u>	<u>0,0</u>	<u>371,7</u>	<u>72,8</u>	<u>98,9</u>	<u>1,1</u>	<u>0,0</u>
	292	3,99	0,0	295,9	58,0	98,0	2,0	0,0
1,6	<u>333,3</u>	<u>3,97</u>	<u>0,16</u>	<u>337,4</u>	<u>66,0</u>	<u>98,9</u>	<u>1,1</u>	<u><0,1</u>
	257,7	3,97	0,16	261,8	51,3	98,4	1,5	<0,1
0,57	<u>294,4</u>	<u>3,95</u>	<u>0,24</u>	<u>298,5</u>	<u>58,5</u>	<u>98,7</u>	<u>1,2</u>	<u><0,1</u>
	259,5	3,95	0,24	263,5	51,6	98,4	1,4	0,1
0,245	<u>156,1</u>	<u>3,93</u>	<u>0,65</u>	<u>160,6</u>	<u>31,5</u>	<u>97,5</u>	<u>2,2</u>	<u>0,4</u>
	113,3	3,93	0,65	117,8	23,0	95,3	3,3	0,55
0,065	<u>37,5</u>	<u>3,87</u>	<u>1,22</u>	<u>42,6</u>	<u>8,3</u>	<u>88,0</u>	<u>9,0</u>	<u>3,0</u>
	2,5	3,87	1,22	7,59	1,4	33,0	51,0	16,0
0,0*	<u>0,1</u>	<u>3,86</u>	<u>1,2</u>	<u>5,16</u>	<u>1,01</u>	<u>1,03</u>	<u>74,80</u>	<u>23,25</u>
	0,03	3,86	1,2	5,09	1,00	0,58	75,83	23,57
0,0**	0,002	3,85	1,2	5,1	1,0	0,05	75,51	23,14
II вариант (постепенная дегазация Земли)								
3,5	<u>81,7</u>	<u>0,88</u>	<u>0,0</u>	<u>82,5</u>	<u>16,1</u>	<u>99,0</u>	<u>1,0</u>	<u>0,0</u>
	42,5	0,88	0,0	43,3	8,3	98,1	1,9	0,0
1,6	<u>203,1</u>	<u>2,55</u>	<u>0,16</u>	<u>205,8</u>	<u>40,3</u>	<u>98,6</u>	<u>1,3</u>	<u><0,1</u>
	144,3	2,55	0,16	147,0	28,8	98,1	1,7	0,1
0,57	<u>248,3</u>	<u>3,47</u>	<u>0,24</u>	<u>252,0</u>	<u>49,4</u>	<u>98,5</u>	<u>1,3</u>	<u>0,1</u>
	176,9	3,47	0,24	180,6	35,4	97,9	1,9	0,15
0,245	<u>140,2</u>	<u>3,77</u>	<u>0,65</u>	<u>144,6</u>	<u>28,3</u>	<u>96,9</u>	<u>2,5</u>	<u>0,4</u>
	91,2	3,77	0,65	95,6	18,7	95,3	3,8	0,7
0,065	<u>32,8</u>	<u>3,89</u>	<u>1,22</u>	<u>37,9</u>	<u>7,4</u>	<u>86,5</u>	<u>10,2</u>	<u>3,3</u>
	0,6	3,89	1,22	5,71	1,1	10,5	68,1	21,4
0,0*	<u>0,0</u>	<u>3,89</u>	<u>1,22</u>	<u>5,11</u>	<u>1,0</u>	<u>0,0</u>	<u>76,12</u>	<u>23,87</u>
	0,0	3,89	1,22	5,11	1,0	0,0	76,12	23,87
0,0**	0,002	3,85	1,2	5,1	1,0	0,05	75,51	23,14

* Расчетные параметры современной атмосферы Земли.

** Фактические параметры современной атмосферы Земли.

Что же представляла собой Земля, согласно расчетам автора, когда на ней появилась жизнь?

По первому, наиболее вероятному, варианту ранней дегазации Земли содержание CO_2 в атмосфере составляло 98,9% и N_2 – 1,1% при полном отсутствии кислорода, а атмосферное давление было около 70 атм. (см. табл. 2).

С учетом растворения CO_2 в гидросфере состав воздуха был практически тем же самым (CO_2 – 98%, N_2 – 2%, O_2 – 0%), но давление было заметно ниже – 58 атм.

Полученные результаты о первичной атмосфере Земли можно было бы принять за плод самой невероятной фантазии автора, но исследование атмосферы Венеры, незначительно отличающейся от Земли как по массе, так и по расстоянию от Солнца, только лишенной воды и жизни, показало, что величина атмосферного давления на ней в настоящее время составляет 90 атм., а содержание CO_2 достигает $97_{-4}^{+3}\%$ и N_2 не более 1 – 2%, а температура на поверхности планеты около 500°C [Флоренский, Волков, Николаева, 1976].

При такой температуре жизнь на Земле, конечно, не могла бы возникнуть и существовать.

Но, во-первых, давление атмосферы на Земле, с учетом растворения CO_2 в гидросфере по первому варианту не могло превышать 50–60 атм., т.е. было все же в 1,5–1,8 раза ниже, чем сейчас на Венере, а по второму варианту дегазации Земли – вообще не превышало 8 атм. К тому же температура на Венере, равная 500°C , определена в наше время, а 3,5–4 млрд. лет назад, когда светимость Солнца была на 30–60% ниже, чем сегодня [Sagan, Mullen, 1972], она явно не могла достигать столь высоких значений, как на современной Венере.

Значительный парниковый эффект на Земле 3,5 млрд. лет назад, конечно, был неизбежен, но температура была все же ниже 100°C , иначе белковая форма жизни не могла бы существовать. В связи с этим весьма интересны данные Эпштейна и Нота, основанные на изучении изотопов кремния, согласно которым среднегодовая температура на поверхности Земли 3 млрд. лет назад оценивается около 70°C .

Тем не менее, Земля во время появления на ней жизни была, конечно, совсем другой, чем сейчас: атмосферное давление, вероятно, было не ниже 50–60 атм., содержание CO_2 в ней 98%, N_2 – 2%, O_2 – 0%; температура на поверхности менее 100°C .

Вода гидросферы была насыщена CO_2 и обладала кислотными свойствами, по существу это был раствор угольной кислоты с рН, вероятно, не выше 3–4; температура кипения воды при давлении 50–70 атм. не могла быть ниже $265\text{--}285^\circ\text{C}$. Любые геохимические процессы в океане должны были значительно отличаться от современных. Высокое атмосферное давление неизбежно должно было резко изменить режим испарения воды, переноса и выпадения осадков.

Затем, с течением времени вплоть до начала кайнозоя (65 млн. лет назад), табл. 2, атмосферное давление постепенно снижалось, по первой модели дегазации Земли, с учетом растворения CO_2 в гидросфере, до 1,4 атм., концентрация CO_2 в атмосфере снизилась до 33%, азота – возросла до 51,1%, а кислорода достигла 16%.

По второму варианту дегазации Земли, с учетом растворения газов в гидросфере, давление к началу кайнозоя снизилось до 1,1 атм., содержание CO_2 в атмосфере упало до 10,6%, азота возросло до 68,1% и кислорода – до 21,3%, почти как в современную эпоху.

Следует отметить, что на первых этапах изменения атмосферы по первому и второму вариантам дегазации Земли результаты расчетов по давлению и составу газов атмосферы отличаются довольно существенно, а с начала палеозоя (570 млн. лет назад) до кайнозоя (65 млн. лет) и современной эпохи – довольно близки.

К концу кайнозоя за 65 млн. лет атмосфера Земли окончательно достигла современного состава и давления.

Широко распространенные представления об атмосфере Земли, не отличимой от современной с начала девонского периода (400 млн. лет назад), не имеют никакого основания, поскольку в атмосфере еще существовала значительная избыточная масса CO_2 – по первой модели дегазации около $220 \cdot 10^{15}$ т, а по второй – около $180 \cdot 10^{15}$ т, еще не переведенная в осадки в виде $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{карб}}$. Атмосферное давление не могло быть ниже 40–27 атм., содержание CO_2 – не меньше 96%, а кислорода – не выше 0,35–0,5%.

Рассмотрим далее основные этапы эволюции органического мира Земли на фоне установленных расчетным путем параметров древних атмосфер Земли.

В архейскую эру (3,5–2,6 млрд. лет) в морях существовали только простейшие одноклеточные прокариотные, не имеющие ядра, сине-зеленые водоросли, известны строматолиты и онколиты.

Атмосфера в начале позднего протерозоя (1,6 млрд. лет) характеризовалась по первому варианту давлением в 51 атм. (с учетом растворения газов в гидросфере), по второму варианту – 29 атм. при содержании CO_2 – 98%, азота – 1,5–1,7%, а кислорода – 0,1%.

Около 1 миллиарда лет назад в рифейское время появились первые эукариотные (со сформировавшимся ядром) водоросли, вероятно, зеленые, а в конце рифея – водоросли с многоклеточным слоевищем.

По Б.С. Соколову [Соколов, 1972] концентрация свободного кислорода, равная 0,2% (точка Пастера), могла быть достигнута в вендское время (600 млн. лет назад), а согласно моим расчетам – несколько позже, в начале палеозоя. Это знаменовало крупный шаг в

развитии организмов – переход от брожения к дыханию. И достигнуто это было самим живым веществом биосферы.

В позднем докембрии (вендская эпоха, 680–570 млн. лет) обнаружены многочисленные остатки одноклеточных водорослей и отпечатки полостных, червей, членистоногих и иглокожих. Атмосферное давление к концу этой эпохи и началу палеозоя составляло 51–35 атм., в составе воздуха 98–97% приходилось на CO_2 , 1,4–1,7% – на N_2 , 0,1–0,15% – на O_2 .

Начало палеозойской эры (570 млн. лет) помимо разнообразных водорослей (сине-зеленых, зеленых, багряных) характеризуется внезапным появлением почти всех типов беспозвоночных животных, многие из которых обладали прочным, сначала хитиново-фосфатным, а затем карбонатным скелетом, то есть началось масштабное выведение избытка CO_2 из атмосферы не только в виде $\text{C}_{\text{орг}}$, но и в виде $\text{C}_{\text{карб}}$. Были широко распространены трилобиты, археоциаты, брахиоподы и, вероятно, многие бесскелетные представители кишечно-полостных, червей и некоторых других групп животных. С течением времени разнообразие органического мира возрастало. Появились губки, остракоды, двухстворчатые и брюхоногие моллюски, морские звезды, морские ежи. Около 500 млн. лет назад появились первые позвоночные – бесчелюстные рыбы, а около 400 млн. лет – первые настоящие рыбы.

Поздний палеозой отличался от раннего заметно большим богатством и разнообразием как животных, так и растений.

До среднего-позднего девона (380–360 млн. лет) как растения, так и животные существовали только в гидросфере и дыхательной смесью у них была вода, содержащая растворенный воздух.

В современную эпоху при давлении в 1 атм. концентрация растворенного в воде кислорода составляет 0,001% вес., причем в составе растворенного воздуха 56–60% приходится на CO_2 , 40% – на N_2 и не более 5–6% – на O_2 .

Атмосферное давление в конце палеозоя (245 млн. лет) было значительно выше современного – от 23 до 18 атм., что определяло значительно большую растворимость воздуха в воде. Его было вполне достаточно для дыхания водных животных, как хватает и сейчас при содержании кислорода в воде всего в 0,001%.

Системы дыхания у водных беспозвоночных животных и рыб разнообразны. Преобладает жаберное дыхание. Предполагается, что у древних трилобитов газообмен осуществлялся мягким покровом брюшка. У губок имеется система канальцев, в которые поступают и пища и кислород. У кишечно-полостных функцию дыхания выполняет

поверхность тела, у мшанок – щупальца. Заднежаберные моллюски часто жабр не имеют и дышат поверхностью тела.

К концу палеозоя (245 млн. лет) атмосферное давление на Земле снизилось до 20–18 атм., концентрация CO₂ в воздухе снизилась до 95%, а кислорода – возросла до 0,55–0,7% (табл. 2). В соответствии с этим величина рН гидросферы должна была возрасти, снизиться температура кипения воды (до 200 °С).

Уровень концентрации кислорода в атмосфере, равный 1/10 от современного (т.е. 2,3%), необходимый по гипотезе Л. Беркнера – Л. Маршала [Беркнер, Маршал, 1966] для образования озонового экрана атмосферы, предохраняющего наземную растительность и наземных животных от ультрафиолетового излучения Солнца, был достигнут в конце силура, т.е. 400–420 млн. лет назад, а по нашим расчетам – значительно позже, только в мезозое. По гипотезе Л. Беркнера – Л. Маршала, поддержанной Б.С. Соколовым [Соколов, 1972], все изменения в атмосфере заключались только в постепенном возрастании с ходом времени концентрации кислорода в воздухе, а по нашей концепции, основанной на строгих расчетах, в значительном изменении не только концентрации O₂, но и самой массы атмосферы.

Для образования озонового экрана, мне кажется, важна не так концентрация O₂ в воздухе, как масса биогенно образовавшегося кислорода, имевшаяся в атмосфере. Считающаяся достаточной для образования озонового экрана масса кислорода, эквивалентная 1/10 от его современного содержания в атмосфере, составляет $0,12 \cdot 10^{15}$ т, а в начале палеозоя при концентрации O₂ в воздухе всего в 0,1–0,15% она составляла, по нашим данным, уже $0,24 \cdot 10^{15}$ т, т.е. была в 2 раза больше, что вполне могло обеспечить образование озонового экрана в начале палеозоя и выход из гидросферы на сушу как растений, так и животных.

Плауновидные растения появились на суше в раннем девоне, но значительное распространение получили только в позднем девоне. Членисто-стебельные появились в среднем девоне, а наиболее широкого распространения достигли в карбоне. Зигоптериевые, ботриоптериевые, маратитовые и калалистовые папоротники появились в конце девона – в начале карбона. Голосеменные арбериевые, кордантовые и тригонокарповые появились в начале карбона.

Таким образом, массовый выход растений из океана на сушу состоялся, в основном, в позднем девоне – 370–360 млн. лет назад. Появились в девоне и первые наземные

беспозвоночные – скорпионообразные, многоножки и насекомые. В конце девона вышли на сушу и амфибии – первые четвероногие животные.

Не противоречат ли этим биологическим фактам данные об атмосферном давлении и составе газов атмосферы? Ведь во время появления амфибий на суше атмосфера Земли была еще скорее «венерианской», чем земной. Давление составляло примерно 30–20 атм., содержание CO₂ – 96%, азота – 3,5%, а кислорода – не более 0,5%.

Но, как известно, система дыхания у самых древних обитателей суши – амфибий – наиболее гибкая. У них развито как легочное, так и кожное дыхание, а у личинок – и жаберное. Современная лягушка дышит не только легкими, а всей поверхностью влажной кожи. Погружаясь в воду, она полностью переходит на кожное дыхание, получая необходимый кислород из растворенного в воде, концентрация которого составляет около 1·10⁻³% вес. Такая концентрация O₂ в воде вполне достаточна для обеспечения кожного дыхания современной амфибии, а для древней, вероятно, тем более. Выход амфибий на сушу означал их переход в газовую среду существования, концентрация O₂ в которой (около 0,5%) превышала в 500 раз ту, которая имела в воде и была вполне достаточна для обеспечения жизни посредством кожного дыхания.

Выход амфибий на сушу означал получение дыхательной смеси несоизмеримо более выгодной по концентрации кислорода, чем та, которая ими ранее использовалась в водной среде.

С начала среднего карбона (320 млн. лет назад) появились на поверхности Земли и рептилии. Атмосферное давление ко времени их появления снизилось до 25–20 атм., концентрация CO₂ в воздухе понизилась до 94%, концентрация O₂ возросла до 0,55–0,6%.

Согласно Л.Ш. Давиташвили [Давиташвили, 1972] некоторые виды рептилий и сейчас сохраняют способность кожного дыхания, а древние, вероятно, обладали этой способностью в большей мере, так что их появление на суше 320 млн. лет назад в атмосфере Земли было вполне возможным.

Появившись на суше, рептилии начали существовать как нормальные четвероногие животные. Однако в поздней перми – раннем триасе они дают начало впервые появившимся на Земле летающим организмам – птерозаврам. Типичный птерозавр мало чем отличается от наземных форм рептилий. Единственное принципиально важное их отличие заключается в том, что крайние четвертые пальцы («мизинцы») передних конечностей при том же количестве фаланг, что и у других пальцев, приобрели в результате мутации размер, вдвое превышающий длину тела. Свисающие с этих непомерно длинных пальцев кожные

перепонки образовали «крыло», несовершенное, но все же позволяющее как-то летать. Они существовали при атмосферном давлении около 20 атм., содержании в воздухе CO₂ до 95%, азота – около 3,5% и кислорода – около 0,5–0,7%.

Существовавшая в это время и сохранившаяся вплоть до начала мезозоя в сто раз более плотная углекислая атмосфера имела, возможно, для рептилий и свои преимущества. В отличие от современной атмосферы при ней за счет облегчения веса могли значительно легче перемещаться по земле огромные динозавры и летать тяжелые, иногда огромные размеров птерозавры, несмотря на все несовершенство их летательного аппарата. Ведь на поверхности Земли они находились в палеозойское время при таком же давлении, как современные животные океана на глубине 500–200 м.

В мезозойскую эпоху (245–65 млн. лет) атмосфера Земли значительно изменилась. Давление снизилось от 23–18 атм. до 1,4–1,1 атм.; концентрация CO₂ снизилась от 95% до 33–10,5%, азота – возросла от 3,3–3,8% до 51–68%, а кислорода возросла от 0,5–0,7% до 15,9–21,3%, т.е. к концу мезозоя – началу кайнозоя (65 млн. лет назад) атмосфера Земли стала значительно более похожей на современную, привычную для нас. Только вот концентрация CO₂ в воздухе была все-таки довольно высокой.

Значительно изменился и органический мир Земли. На смену вымершим палеозойским животным появились новые. В морях широкое распространение получили головоногие моллюски (аммониты и белемниты), двухстворчатые и брюхоногие моллюски, появились шестилучевые кораллы. Из водных позвоночных животных наибольшее распространение получили костистые рыбы и плавающие рептилии. В конце юрского периода (150–144 млн. лет назад) появились первые птицы. Появились и первые малочисленные млекопитающие, мелкие и во многом еще сходные с рептилиями.

Для начала мезозоя были характерны текодонты, самые древние архозавры, от которых потом произошли более поздние динозавры. Они существовали при атмосферном давлении около 20 атм., содержании CO₂ в воздухе до 95%, N₂ – около 3,5% и кислорода – 1,8–2%. Самые крупные ящеротазовые динозавры, весившие, видимо, до 40–50 т, характерны для юрской эпохи (220–150 млн. лет) и существовали при атмосферном давлении около 15 атм., в атмосфере, содержащей около 70% CO₂, 16% N₂ и 7–9% кислорода.

В меловую эпоху (140–65 млн. лет) расцвета достигли разнообразные, в том числе и гигантские, птицетазовые динозавры при среднем давлении атмосферы около 16 атм., содержании CO₂ около 50%, N₂ – 40% и O₂ – 11–12%. Они передвигались на огромных задних конечностях, передние были редуцированы и почти бесполезны.

К концу мезозоя атмосферное давление снизилось до 1,4–1,1 атм., содержание CO_2 – до 30–11%, N_2 – возросло до 51–68% и O_2 – до 16–21,3%.

Однако проявление эпохи повышенной радиоактивности (по мнению автора), а по мнению Л.М. Альвареса [Флоренский, Волков, Николаева, 1976] – удар о Землю и взрыв крупного астероида, привел к вымиранию почти всей этой фауны 65 млн. лет назад.

В кайнозое (65–0 млн. лет) состав животного мира существенно изменился. В морских бассейнах происходит быстрое развитие новых семейств двухстворчатых и брюхоногих моллюсков и костистых рыб, на суше – млекопитающих и птиц. В неогене (25–0 млн. лет) органический мир приобретает большое сходство с современным как по составу фауны, так и флоры.

Атмосфера характеризуется снижением давления от 1,4–1,1 до 1 атм., содержание CO_2 снижается от 33–10% до современного (0,05%); азота возрастает от 51–68% до современного (75,5%), а кислорода возрастает от 15,9–21% до современного (23,14%).

Насекомоядные животные существовали на протяжении всего кайнозоя, т.е. появились когда давление было еще равно 1,4–1,1 атм., концентрация CO_2 достигала 33–10%, а кислорода – 16–21,3%.

Древние хищники существовали также с начала кайнозоя, но вымерли около 25 млн. лет назад к концу олигоценовой эпохи, когда давление уже снизилось до 1,2 атм., а концентрация кислорода достигла 20% и CO_2 снизилась до 15%.

Палеомастадонты, лошади, хоботные животные и обезьяны появились примерно 40 млн. лет назад в начале олигоценовой эпохи и существовали при среднем давлении около 1,2 атм., концентрации CO_2 – 10% и кислорода около 20%, а в конце кайнозоя – уже в условиях современной атмосферы.

Предшественники современного человека (*Homo habilis*) появились 3 млн. лет назад, когда атмосферное давление было уже около 1 атм., концентрация CO_2 была менее 1%, а кислорода достигала 23%, т.е. практически почти как в современную эпоху.

Не противоречат ли полученные результаты о развитии органического мира Земли в условиях существования атмосферы от «венерианской», с давлением от 70–60 атм. и содержанием CO_2 от 98%, до привычной нам современной атмосферы? Мне представляется, что они достаточно хорошо обоснованы глобальными геологическими и геохимическими данными об огромных массах CO_2 , изъятых из палеоатмосферы Земли и захороненных в осадочных толщах в виде $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{карб}}$. Для обоснования массы $C_{\text{орг}}$ использованы средние

значения $C_{\text{орг}}$ для отложений от архея до кайнозоя, основанные на более чем 100 тыс. анализов.

Конечно, объем и масса осадочных пород, а соответственно и массы $C_{\text{карб}}$ и $C_{\text{орг}}$ не могли быть определены абсолютно точно. Но полученные результаты сами за себя говорят. Проведя расчеты для периода от 3,5 млрд. лет назад до конца кайнозоя (0 млн. лет), мы вышли на параметры весьма близкие к характеристикам современной атмосферы Земли (табл. 2). По расчетным данным атмосферное давление оказалось равным современному (1 атм.), концентрация O_2 равной 23,57–23,87%, т.е. чуть выше фактической (23,14%), содержание N_2 – 75,83–76,12% – практически равным современному (75,51%), а концентрация CO_2 – 0,0–0,58% (при фактической 0,05%).

Некоторое беспокойство, конечно, вызывают расчетные данные о непривычно повышенном содержании CO_2 в атмосфере даже в начале кайнозойской эпохи (65 млн. лет назад). Но ведь существуют же безбедно в гидросфере современные растения и животные при концентрации кислорода в воде около 0,001%, при содержании CO_2 в растворенном воздухе около 50–60%.

Что касается наземной растительности, то у нее при повышении концентрации CO_2 до 1–3%, т.е. в 30–100 раз, установлено даже возрастание биопродуктивности.

Как уже упоминалось ранее, насекомоядные животные появились в начале кайнозоя (65 млн. лет назад), когда атмосферное давление составляло 1,4–1,1 атм., а концентрация CO_2 в воздухе достигала 33–10%. И сейчас насекомоядные животные – ежи, кроты, землеройки, ведущие роющий образ жизни, вполне нормально существуют в почве, в которой концентрация CO_2 в воздухе, вследствие разложения органического вещества, составляет от 1–5% до 12%, т.е. выше, чем в современной атмосфере в 30–400 раз.

Даже у человека содержание CO_2 в воздухе до 2%, т.е. в 60 раз больше, чем в атмосфере, не вызывает никаких заметных беспокойств, хотя при возрастании концентрации CO_2 до 4% ведет уже к быстрой утомляемости, возрастании мускульных усилий, а при концентрации CO_2 в 10% возникает мучительное состояние, головная боль и начинается оцепенение. Но ведь человек и появился впервые, когда атмосфера уже практически не отличалась от современной ни по давлению, ни по концентрации O_2 в воздухе.

По мнению автора, человек несет в себе самую память о том, что его предшественники – высшие млекопитающие – жили при существовании атмосферы, в которой концентрация CO_2 была выше, чем в современную эпоху. Дело в том, что необходимая для нормального жизнеобеспечения концентрация CO_2 в крови человека должна быть не ниже 6–6,5%. Это и

наблюдается у молодых людей, ведущих активный образ жизни и испытывающих нагрузки. С возрастом и переходом к менее активной жизни у людей концентрация CO_2 в крови снижается до 2–3%. Это приводит к сужению артериол, мельчайших кровеносных сосудов, ухудшению кровоснабжения организма. Мозг дает команду повысить давление, чтобы кровоснабжение организма вновь стало нормальным. Результат – появление миллионов человек, страдающих гипертонической болезнью, а затем инфарктами и другими болезнями.

Единственный способ нормализовать давление и кровоснабжение организма – повысить содержание CO_2 в крови до физиологически нормального – 6–6,5%, чему способствует систематическое использование прибора, в котором концентрация CO_2 в воздухе повышается от 0,3 до 1,5%, т.е. в 10–50 раз.

Все многочисленные лекарства способны только временно понизить давление, но на устранение причины возникновения гипертонической болезни абсолютно не влияют. Эта проблема оказалась весьма важной и в космонавтике, откуда и появились прибор и метод лечения. При полете в космосе за 2–3 месяца в условиях невесомости и полного отсутствия физической нагрузки молодой космонавт превратился бы в слабого больного человека, если бы на космических кораблях не использовалась дыхательная смесь, разработанная Н.А. Агаджаняном, которая содержит в десятки раз больше CO_2 , чем воздух земной атмосферы.

Как видно, несколько повышенная концентрация CO_2 не только не вредна, но полезна даже для человека.

Рассмотренные материалы позволяют заключить, что живое вещество биосферы, существующей на Земле не менее 3,5 миллиардов лет, является важным планетарным фактом, значительно изменившим нашу планету – ее атмосферу, гидросферу и даже земную кору. Из первичной атмосферы живое вещество убрало в земную кору через гидросферу $367,7 \cdot 10^{15}$ т CO_2 в виде отмершего органического вещества и карбонатных пород, понизило атмосферное давление от 70–60 атм. до 1 атм., понизило концентрацию CO_2 в атмосфере от 98% до 0,05%, произвело огромную массу кислорода – $28,9 \cdot 10^{15}$ т, которая, в основном, израсходована на окислительные процессы, но и в атмосфере все же осталась в необходимом для жизни количестве ($1,2 \cdot 10^{15}$ т) при его концентрации в воздухе в 23,14%.

Существенная доля в газах при первичной дегазации Земли и образовании ее первичной атмосферы принадлежала CO_2 и N_2 . Да и сейчас в глубинных породах мантии помимо водорода содержится до 12% CO_2 , до 35% N_2 , не более 1% метана.

С появлением биосферы, вследствие накопления отмершего органического вещества в осадочных породах, состав продуктов дегазации Земли существенно изменился. В газах,

образующихся при термической деструкции органического вещества, содержится 23%вес. углеводов, в основном метана, и 63%вес. CO₂. Масштабы образования газов при термическом разложении органического вещества, созданного живым веществом биосферы, огромны. Только за последние 600 млн. лет образовалось примерно $6 \cdot 10^{18}$ м³ CO₂.

Таким образом, масса и состав газов при современной дегазации недр Земли в значительной мере также предопределены органическим веществом биосферы.

А можно и еще более просто отразить планетарное значение живого вещества биосферы. Если бы 3,5 млрд. лет назад на Земле не появилась жизнь и не возникла биосфера, то при современной светимости Солнца на 30–60% более высокой, чем несколько миллиардов лет назад, Земля сейчас практически не отличалась бы от современной Венеры, была бы мертвой планетой с атмосферой, состоящей на 98% из CO₂ при атмосферном давлении около 70–80 атм., с температурой на поверхности не менее 400–500⁰С. И если бы даже в соответствии с гипотезой панспермии на Землю были бы занесены живые организмы, они моментально бы погибли. Жизнь появилась в нужное время и в нужном месте.

Биосфера является сложной саморазвивающейся системой. Именно она сама начала производить свободный кислород, достижение концентрации которого в атмосфере до 0,2%, как полагают, дало возможность перейти от процессов брожения к процессам дыхания организмов; сама произвела количество кислорода, необходимое для образования озонового экрана, защищающего организмы от ультрафиолетового излучения Солнца. Сама обеспечила возможность прогрессивного развития организмов вплоть до высших млекопитающих, в том числе и человека, существенно изменив атмосферу Земли, снизив атмосферное давление до 1 атм. и повысив содержание кислорода в воздухе до 23%.

Биосфера пережила периодические проявившиеся в истории Земли эпохи повышенной радиоактивности, причиной которых было заражение среды обитания ураном [Неручев, 1977]. При подавленности и вымирании многих наиболее развитых организмов эти эпохи характеризовались всплеском биопродуктивности фитопланктона, в основном сине-зеленых водорослей. Они интенсивно накапливали в своих телах уран, а отмирая, опускались на морское дно, образуя осадки с аномально высокой концентрацией органического вещества (до 10–20%) и урана, превышающей кларковую для осадочных пород ($3,2 \cdot 10^{-4}$ %) в десятки и сотни раз. За 2–3 млн. лет биосфера таким образом очищалась от избытка урана и далее развивалась в нормальных условиях.

По мнению радиобиологов и сейчас в биосфере действует в принципе такой же механизм выведения искусственных радиоактивных изотопов из гидросферы, которые

появились в ней вследствие проведения атомных взрывов и при авариях различных промышленных установок.

Биосфера является устойчиво развивающейся системой, способной преодолевать существенные изменения, возникающие в окружающей среде. Но лучше ей все-таки не мешать, загрязняя различными вредными веществами, особенно радиоактивными, не допускать возникновения избытка CO₂ в атмосфере вследствие неумеренного сжигания топлива, заготовленного, кстати сказать, для нас живым веществом биосферы. Биосфера все это переживет, а вот для человеческого общества вызванные избытком CO₂ изменения климата могут иметь серьезные последствия.

Автор выражает надежду, что произведенное рассмотрение этой важной междотраслевой научной проблемы привлечет внимание специалистов из разных областей знания, изучающих биосферу, что позволит в дальнейшем подтвердить, уточнить, а, может быть, и оспорить какие-либо из развиваемых автором положений, что будет способствовать более углубленному пониманию биосферы Земли.

Литература

Беркнер Л., Маршал Л. Кислород и эволюция // Земля и Вселенная. - 1966. - № 4. - С. 32-38.

Давиташвили Л.Ш. Учение об эволюционном прогрессе. - Тбилиси. - 1972. - 324 с.

Неручев С.Г. Опыт количественной оценки параметров древних атмосфер Земли // Известия АН СССР, сер. геол. - 1977. - № 10. - С. 9-22.

Неручев С.Г. Уран и жизнь в истории Земли. Издание 2. - СПб.: ВНИГРИ. - 2007. - 328 с.

Романкевич Е.А., Ветров А.А., Пересыпкин В.И. Органическое вещество Мирового океана // Геология и геофизика. - 2009. - Т. 50. - № 4. - С. 401-411.

Ронов А.Б. Вулканизм, карбонатонакопление, жизнь (закономерности геохимии углерода) // Геохимия. - 1976. - № 8. - С. 1252-1272.

Соколов Б.С. Докембрийская биосфера в свете палеонтологических данных // Вестник АН СССР. - 1972. - № 8. - С. 48-54.

Флоренский К.П., Волков В.П., Николаева О.В. К геохимической модели тропосферы Венеры // Геохимия. - 1976. - № 8. - С. 1135-1150.

Alvares L.M. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction // Science. - 1980. - Vol. 208. - No. 4. - P. 44-48.

Sagan C. and Mullen G. Earth and Mars. Evolution of Atmospheres // Science. - 1972. - Vol. 177.

Neruchev S.G.All-Russia Petroleum Research Exploration Institute (VNIGRI), Saint Petersburg, Russia, ins@vnigri.ru

TRANSFORMATION OF PLANET EARTH BY BIOSPHERE LIVING MATTER

The main stages of the biosphere history for 3.5 billion years are analyzed. The significant planetary role of the biosphere living matter in a significant transformation of the planet Earth (Earth's crust, its hydrosphere and its atmosphere) is shown.

The biosphere is a complex self-developing system, which has gradually created more favorable conditions for appearance and existence of new, improved organisms up to higher mammals culminating in humans. The biosphere ensured the possibility of ozone screen building, which protects from the sun's ultraviolet radiation. The biosphere has significantly changed the Earth's atmosphere by reducing the atmospheric pressure of 70 atm. to 1 atm., removing huge amount of carbon dioxide from the atmosphere to the crust and increasing the concentration of oxygen up to contemporary amount necessary for breathing of the most advanced organisms.

A huge amount of geological, geochemical and paleobiological data were analyzed for the purpose of study and substantiation of the role of biosphere living matter in the transformation of the planet Earth.

Key words: biosphere, living matter, atmosphere, hydrosphere, organic world.

References

Berkner L., Marshal L. *Kislород i evolyutsiya* [Oxygen and evolution]. Zemlya i Vselennaya, 1966, no. 4, p. 32-38.

Davitashvili L.Sh. *Uchenie ob evolyutsionnom progresse* [The study of evolutionary progress]. Tbilisi, 1972, 324 p.

Neruchev S.G. *Opyt kolichestvennoy otsenki parametrov drevnikh atmosfer Zemli* [Experience in quantitative estimates of the parameters of the ancient atmosphere of the Earth]. Izvestiya AN SSSR, ser. geol., 1977, no. 10, p. 9-22.

Neruchev S.G. *Uran i zhizn' v istorii Zemli* [Uranium and life in Earth's history]. 2nd edition. Saint Petersburg: VNIGRI, 2007, 328 p.

Romankevich E.A., Vetrov A.A., Peresyarkin V.I. *Organicheskoe veshchestvo Mirovogo okeana* [Organic matter of the oceans]. Geologiya i geofizika, 2009, vol. 50, no. 4, p. 401-411.

Ronov A.B. *Vulkanizm, karbonatonakoplenie, zhizn' (zakonomernosti geokhimii ugleroda)* [Volcanism, carbonate accumulation, life (laws of carbon geochemistry)]. Geokhimiya, 1976, no. 8, p. 1252-1272.

Sokolov B.S. *Dokembriyskaya biosfera v svete paleontologicheskikh dannykh* [Precambrian biosphere in terms of paleontological data]. Vestnik AN SSSR, 1972, no. 8, p. 48-54.

Florenskiy K.P., Volkov V.P., Nikolaeva O.V. *K geokhimicheskoy modeli troposfery Venery* [On the geochemical model of the troposphere of Venus]. Geokhimiya, 1976, no. 8, p. 1135-1150.

Alvares L.M. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. Science, 1980, vol. 208, no. 4, p. 44-48.

Sagan C. and Mullen G. Earth and Mars. Evolution of Atmospheres. Science, 1972, vol. 177.

©**Неручев С.Г.**, 2013