

**Белевцев Р.Я.**

*ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины»*

## **В.И. ВЕРНАДСКИЙ О ГЕОХИМИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

*В статье приведены основные научные выводы академика В.И. Вернадского, опубликованные в новых изданиях его избранных научных трудов, касающиеся геохимии окружающей среды (в виде цитат) и прилагающиеся к ним авторские комментарии с обсуждением их в свете развития науки на современном уровне. В частности, рассматриваются актуальные проблемы по геохимии живого вещества; постоянства массы живого вещества; возникновения жизни и процесса абиогенеза; геохимии техногенеза; геохимии изотопов; ядерной энергетики; генезиса уранового оруденения. Подчеркнуты несомненный важный научный вклад В.И. Вернадского в решение этих проблем и его наиболее дискуссионные представления о решающей роли жизни при формировании атмосферы (особенно свободного кислорода), а также о постоянстве массы живого вещества со времени архейской эпохи.*

### **Введение**

Владимир Иванович Вернадский – основатель важнейших и актуальных научных направлений геохимии окружающей среды, таких как геохимия живого вещества, космохимия, радиогеология, ноосфера и техносфера, ядерная энергетика и др. В честь 150-летия со дня рождения великого ученого, создателя и организатора Украинской академии наук, в НАН Украины совместно с Национальной библиотекой им. В.И. Вернадского были проведены работы по изучению и разработке научного наследия В.И. Вернадского, изданию его трудов с комментариями современных ученых в свете развития его идей. Работы с участием ученых Института геохимии окружающей среды НАН Украины проводились по направлениям: геохимия и радиогеология (том 7, книги 1 и 2) и геохимия живого вещества (том 4, книги 1 и 2). Были сделаны комментарии к наиболее актуальным и проблемным представлениям и выводам В.И. Вернадского. Многие комментарии носят дискуссионный характер, что отражает как различие в представлениях, так и наличие новых научных данных, полученных за прошедшее почти столетие со времени публикации работ В.И. Вернадского. Надо заметить, что в XIX веке и в первой половине XX века еще было мало данных о химическом составе, эволюции земной коры и живых организмов и поэтому некоторые выводы В.И. Вернадского имели лишь предварительный характер. Например, он решающее значение придавал живым организмам и биохимическим реакциям при формировании свободного атмосферного кислорода и азота, нефти и горючего газа, считал, что масса живого вещества является планетной константой со времени архейской эры, но в то же время соглашался с принципом Ф. Реди «все живое только от живого».

Ниже приведены основные научные выводы из опубликованных избранных трудов В.И. Вернадского в новых изданиях [1–4], касающиеся геохимии окружающей среды (в виде цитат) и прилагающиеся к ним наши комментарии с обсуждением их в свете развития науки на современном уровне.

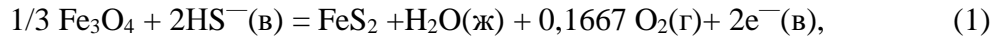
### **О геохимии живого вещества**

*«Мы знаем в биосфере одну единственную реакцию образования свободного кислорода большого масштаба (Д. Пристлей, Т. де Соссюр). Это – реакция биохимическая, выделение свободного кислорода хлорофильными пластинами живых организмов. Несомненно, эта реакция образования свободного кислорода, в земной коре не единственная, но поскольку можно судить, она единственная, которая дает значительные массы свободного кислорода в составе атмосферы, облекающей нашу планету» [3].*

*«Правильно будет заключить – земная газовая оболочка, наш воздух (свободные кислород, азот, также CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S), есть создание жизни» [3].*

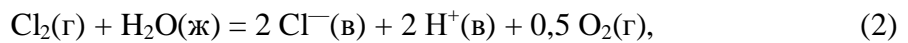
*«Мы уже видели, что зеленые хлорофильные организмы являются главным механизмом биосферы, который улавливает солнечный луч и создает фотосинтезом химические тела, энергия которых в дальнейшем является источником действенной химической энергии биосферы, а в значительной мере – всей земной коры» [1].*

В земной коре проходит немало реакций восстановления оксидов (например, магнетита, гематита) хлором или сероводородом с выделением свободного кислорода. Например, превращение магнетита (или гематита) в пирит в щелочной среде по такой реакции [5, 6]:



$\Delta G_{298}(1) = -28 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}$ , где  $\Delta G_{298}$  – свободная энергия реакции; г – газ; ж – жидкость; в – в водном растворе.

Также по абиогенной реакции между постмагматическим хлором и жидкой водой образуется свободный кислород в атмосфере, гидросфере и земной коре [7, 8]:



$\Delta G_{298}(2) = -25,5 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}$ .

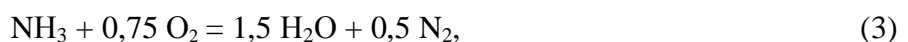
Возможны и другие химические абиогенные реакции в земной коре и атмосфере Земли с выделением свободного кислорода. Это особенно касается древнейших геологических эпох – архея и раннего протерозоя, когда РТ-условия были неблагоприятны для жизни – температура была значительно выше 100 °С, а вода в морях имела сильно кислую реакцию (рН было менее 1) [5, 7—12]. К тому же хлорофилсодержащие фитобактерии и растения не могут существовать без свободного кислорода. Они накапливают углеводы за счет солнечной энергии днем, а ночью дышат кислородом, и как аэробы используют энергию окисления накопленных днем углеводов кислородом. Правда, В.И. Вернадский сам признает, что *«зеленые автотрофные организмы требуют для своего существования присутствия свободного кислорода...»* [1].

Теперь о температуре во внешних геосферах с архея. Теплогенерация при формировании коры связана с распадом радионуклидов, остыванием коры, выделением тепла при кристаллизации магмы, уплотнением земной коры и мантии при кристаллизации магмосфер и газовой выделении. Суммарная выделенная Землей энергия в архее составила около  $10^{31}$  Дж или  $10^{22}$  Дж×год<sup>-1</sup>. Это примерно на порядок больше, нежели современный тепловой поток с поверхности Земли –  $10^{21}$  Дж×год<sup>-1</sup> [7—10, 13—17].

Температура земной поверхности при кристаллизации коровой плагиогранитовой магмы 3,8 млрд лет назад была 750—800 °С и постепенно опустилась до нормальной температуры при литогенезе рифейских овручских кварцитов в кислом океане 1,3—1,0 млрд лет назад [7—11]. Критическая температура воды (375 °С) с появлением жидкой воды была достигнута примерно 2,8 млрд лет назад (рис. 1).

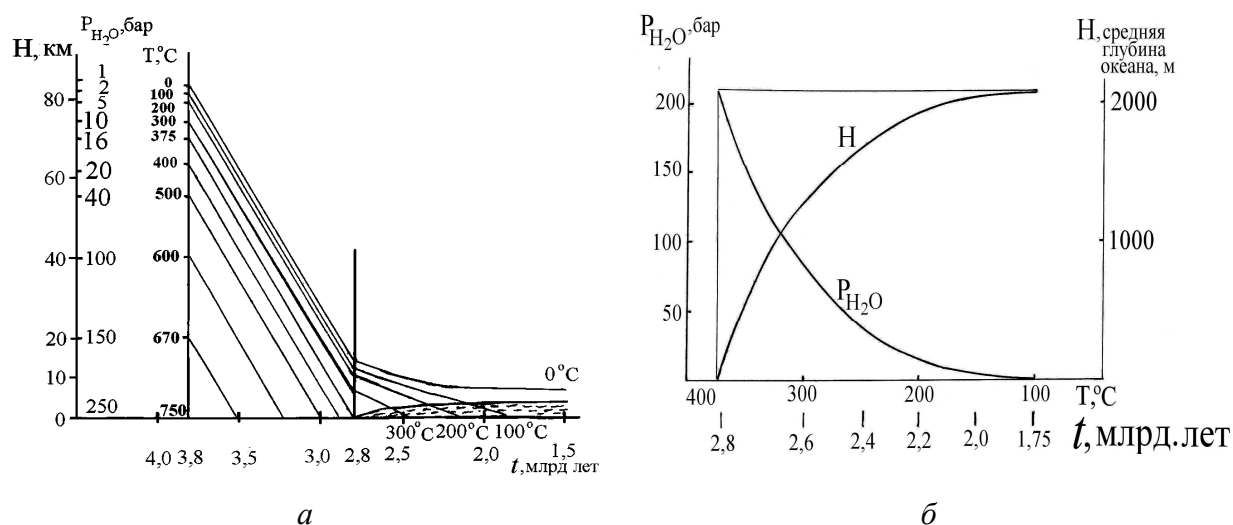
Поэтому нельзя согласиться с выводом В.И. Вернадского о том, что выделение свободного атмосферного кислорода происходит исключительно в результате биохимических реакций. Тем более это невозможно было в архее. Вероятнее формирование свободного кислорода по реакции (2) начиная с раннего протерозоя, когда температура в атмосфере Земли уменьшилась до критической температуры воды – 375 °С и появилась жидкая вода [7, 8, 12].

Что касается азота, то молекулярный газ N<sub>2</sub> в атмосфере устойчив в ассоциации с O<sub>2</sub>, поскольку газообразный вулканогенный аммиак окисляется до водного пара и оксидов азота, которые неустойчивы (NO и NO<sub>2</sub> имеют положительное значение  $\Delta G_{298}$  – свободной энергии образования) и разлагается до азота по реакции:



$\Delta G_{298}(3) = -326 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}$ .

Поэтому в атмосфере Земли устойчивы постагматические газы – свободный кислород и азот, а участие в этом процессе живого вещества незначительно [7, 8, 11, 12].



**Рис. 1.** Зависимость высоты ( $H$ , км),  $P_{H_2O}$ , и температуры ( $T$ ) докембрийской газо-водной атмосферы ( $a$ ); а также глубины протерозойского океана ( $H$ , м) от возраста ( $t$ ) ( $b$ ) [7, 8, 12]

#### О постоянстве массы живого вещества

*«Постоянство массы живого вещества. Таким образом «Масса живого вещества, по-видимому, является планетной константой со времени архейской эпохи, т.е. за все дление геологического времени» [3].*

*«Поле жизни, т.е. температура и давление, связанный с этим климат и химический характер среды существуют непрерывно, в общем неизменно со времени архейской эры. В течение более чем полутора миллиарда лет поле жизни было аналогично современному. Огромна часть архейской эры, может быть вся, была уже охвачена жизнью, в основных чертах аналогичной современной, с ней генетически связанной. Биосфера существовала все это время неизменно» [2].*

Основная масса биогенного углерода сосредоточена в осадочных породах, однако скорость отложения осадков увеличивается со временем, начиная с нижнего рифея [7, 8, 11, 12, 16]. И поэтому масса осадочного биогенного углерода также увеличивается со временем и максимальна при современном осадконакоплении, также как и совершенство живых организмов. В раннем протерозое и тем более в архее осадков и живых организмов либо не было совсем, либо их масса незначительна и на несколько порядков меньшая, нежели в неогее и особенно в фанерозое. Хорошо известно, что жизнь эволюционировала с рифея, и особенно в течение фанерозоя, как качественно, так и количественно [7, 8, 11].

Отсюда вывод: геологическая эволюция сопровождается увеличением совершенства живых организмов и массы живого вещества. Поэтому нельзя согласиться с заключением В.И. Вернадского о постоянстве массы живого вещества в течение геологической эволюции, а тем более с архея.

#### О возникновении жизни. Проблема абиогенеза

*«Существование резкой границы между живым и косным веществом, в том числе особый характер энергии, связанный с проявлением жизни. Эти принципиальные различия были сформулированы Ф. Реди в виде афоризма: «Все живое из живого». Это было отрицание самопроизвольного зарождения жизни и абиогенеза. Хотя до сих пор существование абиогенеза пытаются доказать, но тщетно» [3].*

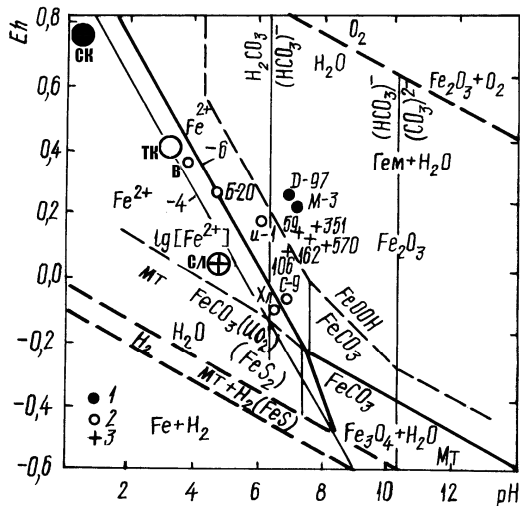
Биохимические реакции энергонакопления ничем принципиально не отличаются от самопроизвольных химических реакций в геосферах, при которых выделяется свободная

енергия Гиббса ( $\Delta G$ ) или тепловая энергия (энтальпия –  $\Delta H$ ). Примером таких реакций являются реакции окисления, например, двухвалентного железа до трехвалентного:

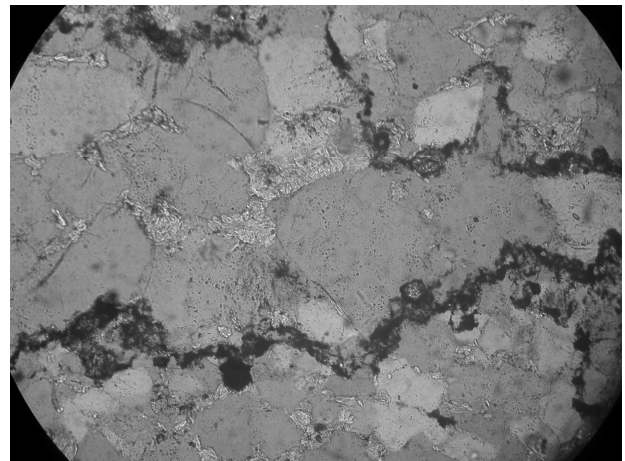


$$\Delta G_{298}(4) = -127,5 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}; \Delta H_{298}(4) = -146,2 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}.$$

Эта окислительная реакция весьма распространена в современной зоне гипергенеза кристаллических пород, где за счет первичных железистых минералов идет образование гематита или лимонита часто с участием аэробных железобактерий [5, 10]. Химическую энергию реакции (4) железобактерии используют для осуществления обмена веществ, в том числе для ускорения этой реакции, для движения, роста и размножения. Впервые благоприятные условия для жизни таких бактерий возникли в земной коре в рифее, когда температура снизилась до нормальной, также как и кислотность воды океанов и морей [7, 11, 12]. В рифейских овручских кварцитах и сланцах содержатся гематит и графит, как вероятные продукты деятельности железобактерий. И есть все основания считать появление последних результатом первичного абиогенеза, в течение которого органическое вещество организуется в живую клетку. Первичными осадками овручских кварцитов были пески, отлагающиеся на небольшой глубине в кислой среде ( $\text{pH} = 0,15\text{—}1,0$ ) при окислительных условиях ( $E_h = 0,8 \text{ В}$ ), которые были неблагоприятны для жизни [11]. Однако, в морском бассейне на значительных глубинах (50—70 и более м) при слабокислых ( $\text{pH} = 4\text{—}6$ ) и слабо восстановительных условиях ( $E_h$  около 0) отлагались глинистые породы (теперешние хлорит-мусковит-биотитовые сланцы), в составе которых имеется органический углерод (0,2—0,5 %) (рис. 2, 3).

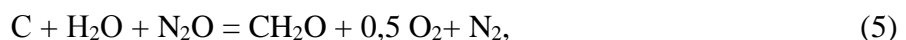


**Рис. 2.** Диаграмма  $E_h - \text{pH}$  для литогенеза осадков овручской серии нижнего рифея [11]: СК – светлые кварцито-песчаники, ТК – темные кварцито-песчаники, СЛ – мусковитовые сланцы. Основа [5, 10, 11] – диаграмма  $E_h - \text{pH}$ : 1 – лимонитовые прожилки в гранитах; 2 – почвы и растения (Б-20, В (Вересня) – подзолистая, И-1 – чернозем, С-9 – торф, Хл – хлорофилл); 3 – пористая вода в гранитах, скв. 1, глубина, м.



**Рис. 3.** Тонкие темные прослои (мощностью 0,03—1,0 мм) сложены гематитом, вадом, цирконом, ильменитом, графитом в м/з светлом кварцито-песчанике. Обломки Кв 0,1—0,2 мм в поперечнике. Есть окатанный циркон – 0,06 мм [11].

Образование первичного абиотического углевода возможно при участии графита, воды и оксидов азота, или метана с кислородом по таким гипотетическим реакциям [5, 10, 11]:



$$\Delta G_{298}(5) = -19 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}.$$



$$\Delta G_{298}(6) = -101 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}.$$

Энергию реакций восстановления используют для жизни анаэробы, например, сульфатредуцирующие бактерии. Фитобактерии и зеленые растения днем вырабатывают углеводы за счет энергии солнечного излучения как анаэробы, а ночью окисляют эти накопленные углеводы как аэробы. Они являются более сложными, нежели первые простейшие аэробы и анаэробы и видимо появляются позднее последних [5, 7, 8, 10, 11].

Жизнь относится к развивающимся процессам с низкой энтропией и с четким порядком [10, 11, 18]. Когда через толщу придонных песчаных осадков водного бассейна (моря, озера) и через толщу воды поднимается поток веществ и энергии, которые выделяются по реакциям (4), (5) и (6), то углеводы могут самопроизвольно принять участие в этих реакциях (в обе стороны через состояние равновесия). Из них могут образоваться обособленные структуры, в которых течение этих реакций будет регулироваться. Т.е. из потока энергии и вещества в водном бассейне возникают участки с неким порядком и структурой, который окажется предпочтительнее беспорядка и это приводит к уменьшению энтропии системы по И. Пригожину [18]. В этих структурах ускоряются химические реакции и упорядочивается обмен веществ и энергии. Часть энергии уйдет на этот порядок и структурообразование и, поэтому, эти новые структуры будут стремиться к обособлению с образованием неких мембран и оболочек. Потери в энергии приведут к уменьшению энтропии в этих структурах (некоторая аналогия с образованием кристаллов), но эти новые обособления будут проницаемы для энергии и вещества, благодаря пористой внутренней структуре углеводов. Таков возможный механизм абиогенного процесса эволюции и порядка в углеводной органике в потоке энергии и вещества, в результате которого образуются углеводные обособленные структуры (клетки) и в которых энергия и вещество химических реакций могут регулироваться и саморегулироваться, т.е. осуществляться нечто подобное обмену веществ [7, 8, 10, 11]. Такая углеводная структура (клетка) осуществляет обмен веществ: принимает из водного раствора катион  $\text{Fe}^{+2}$  и анион кислорода ( $\text{O}_2^{-2}$ ) соединяет их по реакции (4), при этом образуется гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) или лимонит ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), которые клетка выбрасывает как отходы, а выделенную энергию она использует для своего дальнейшего совершенства. Такая клетка пока неустойчива, но уже почти живая, но для совершенства ей надо еще размножиться. А для размножения уже необходима генная структура, создание которой потребует дополнительной энергии, проб и ошибок, а также времени. Возможны и другие первичные организмы – это преимущественно аэробные хемобактерии, окисляющие метан, водород, аммиак, серу, а также, в меньшей степени, анаэробы, например, сульфатредуцирующие бактерии [7, 8]. Таков схематично возможный путь абиогенеза – живое из неживого! Судя по геологической эволюции продолжительность такого абиогенеза может составить сотни миллионов лет в нижнем рифее, а переход от одноклеточных к многоклеточным организмам – 500—700 млн от нижнего рифея к фанерозою [7, 8]. И лишь в фанерозое бурно эволюционируют многоклеточные организмы – как растения, так и животные.

### О геохимии техногенеза

*«Человек вводит в земную кору новые неустойчивые соединения, которые являются источником более интенсивной активной энергии, увеличивают свободную энергию земной коры. Он нарушает старинные геохимические циклы и появилась новая огромная геологическая сила на поверхности нашей планеты. Равновесие в миграции элементов, которое установилось в течение геологических времен, нарушается разумом и деятельностью человечества. Мы находимся в настоящее время в периоде изменения этим путем условий термодинамического равновесия внутри биосферы»* [3].

За прошедшие почти сто лет со времени написания этого заключения В.И. Вернадского о геохимической деятельности человечества его предположения полностью оправдываются. Развивающийся техногенез все сильнее нарушает термодинамическое равнове-

сие в биосфере с привнесением дополнительных веществ и энергии с уменьшением энтропии системы. Это приводит ко все большей неустойчивости окружающей природной среды, в том числе к ее разрушению: перенаселению, угнетению и уничтожению многих видов фауны и флоры, загрязнению токсичными отходами, глобальному потеплению, усилению ураганов и наводнений, выгоранию свободного кислорода атмосферы и т.д. [7, 8, 10, 11, 17, 19, 20].

### О геохимии изотопов

*«Научно будет правильным проверить сейчас гипотезу, что организм может различно относиться к изотопам, смесями которых являются земные химические элементы, что живое вещество в своей жизненно основной части, по крайней мере, состоит из чистых изотопов и что оно способно разлагать смеси изотопов и избирать из них некоторые. Организм относится к тяжелой воде иначе, чем к воде обыкновенной, т.е. организм различает два водорода, а следовательно, можно ожидать с большой уверенностью и существование в нем общей способности разно относиться к разным изотопам одного и того же элемента... Возможно еще, что в живых веществах мы встретимся с чистыми, лишенными или очень обедненными тяжелыми изотопами O, N, C» [1].*

По данным многих биологов (например, академика НАН Украины Д.М. Гродзинского) живые организмы, особенно растения, избирательно относятся к изотопам элементов (водорода, углерода, кислорода, серы), почти избегая тяжелых изотопов при обмене веществ с окружающей средой. Вероятно, это может быть связано с тем, что растения осуществляют обмен веществ преимущественно в восстановительной среде с участием водорода, метана или углеводов, в равновесии с которыми в водном соке растений содержание тяжелых изотопов дейтерия,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$  значительно меньше, чем в окислительных условиях [19—25]. Отсюда следует вывод, что гипотеза В.И. Вернадского о способности живых организмов разлагать смеси изотопов и избирать из них преимущественно легкие изотопы подтверждается. Хотя необходимо провести дальнейшие исследования этой проблемы, поскольку совершенно избавиться от тяжелых изотопов невозможно, поскольку, чем меньше содержание тяжелых изотопов, тем больше энтропия смешения изотопных растворов и тем устойчивее последние [21]. Этим, возможно, объясняется присутствие в растениях незначительных, но радиационно опасных для них содержаний трития (порядка  $10^2$ — $10^4$  Бк $\times$ дм $^{-3}$ ) [26].

Необходимо отметить, что во многих современных работах по геохимии изотопов преимущественно обсуждаются физические свойства разных изотопов элементов [27], главным образом атомов (четность ядер, спин, магнитный момент). В то время как химия – это наука о веществах – об их строении, составе, свойствах, о реакциях, в результате которых одни вещества превращаются в другие [19]. Эти реакции и обмен веществ с участием разных изотопов определяются не физическими свойствами атомов, а термодинамикой реакций с участием молекул тяжелых и легких изотопов. Это хорошо известно для воды, в которой дейтерий (**D**) и  $^{18}\text{O}$  образуют устойчивую молекулу тяжелой воды, поскольку существует четкая корреляция между концентрациями этих тяжелых изотопов [21, 24, 28, 29]. Поэтому вода представляет собой раствор молекул легкой и тяжелой воды, причем содержание последней увеличивается от пара к жидкости в окислительной и щелочной обстановке. Особенно обедняется вода дейтерием в атмосфере водорода, метана и в ассоциации с органическими веществами. Такие закономерности объясняются термодинамическими параметрами молекул легкой и тяжелой воды, а не физическими свойствами атомов разных изотопов. Видимо потому, что в молекулах веществ элементы представлены не изолированными атомами, а преимущественно ионами. Например, магнетит (**Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**) – магнитен, а другой оксид железа – гематит (**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**) – немагнитен. И это явление объясняется не свойствами атомов железа, а валентностью его ионов в разных веществах. Также и для сульфидов железа: пирротин (**FeS**) – магнитен, а пирит (**FeS<sub>2</sub>**) – немагнитен.

Процессы обмена изотопами в живом организме определяются химическими реакциями между веществами. Например, реакция окисления углеводов с выделением углекислого газа  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  имеет свободную энергию  $\Delta G_{298} = -480 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}$  и энтальпию  $\Delta H_{298} = -470 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}$ , т.е. смещается вправо с выделением значительной энергии. Обогащенный тяжелыми изотопами ( $^{13}\text{C}$  и  $^{18}\text{O}$ ) углекислый газ удаляет из живого организма при дыхании около 5—10 % тяжелых изотопов по массе, обогащая организм легкими изотопами. По аналогичным реакциям в восстановительной среде живой организм избавляется также и от дейтерия. Например, по реакции окисления метана с выделением углекислого газа и воды  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  с  $\Delta G_{298} = -340 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}$ . Или по реакции окисления спирта:  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\Delta G_{298} = -1100 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}$ . Логично предположить, что чем здоровее организм человека и энергичнее в нем идут реакции окисления органических продуктов питания, тем основательнее из него происходит вынос тяжелых изотопов  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$  и  $^2\text{H}$  и обогащение тканей организма легкими изотопами. В целом можно согласиться с прогнозом В.И. Вернадского о самоочищении живых организмов от тяжелых изотопов, однако полного выноса тяжелых изотопов при этом не происходит [21].

### О ядерной энергетике

*«Мы приходим к великому перевороту в жизни человечества. Недалеко то время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который дает ему возможность строить свою жизнь, как он захочет. Это может случиться в ближайшие годы, может случиться через столетия. Но ясно, что это должно быть. Сумеет ли человек воспользоваться этой силой, направить ее на добро, а не на самоуничтожение? Дорос ли он до умения использовать эту силу, которую неизбежно должна дать ему наука? Ученые не должны закрывать глаза на возможные последствия их научной работы, научного процесса. Они должны себя чувствовать ответственными за последствия их открытий. Они должны связать свою работу с лучшей организацией всего человечества»* [17].

В настоящее время все человечество озабочено тремя главнейшими проблемами: топливно-энергетической, поисками новых источников питания в связи с ростом численности населения земного шара и быстро растущим загрязнением окружающей среды в связи с развитием промышленного производства. Среди основных источников энергии все большее практическое применение получает энергия атома (точнее ядерная энергия). Она является наиболее экономически целесообразной и перспективной с точки зрения охраны окружающей среды [20].

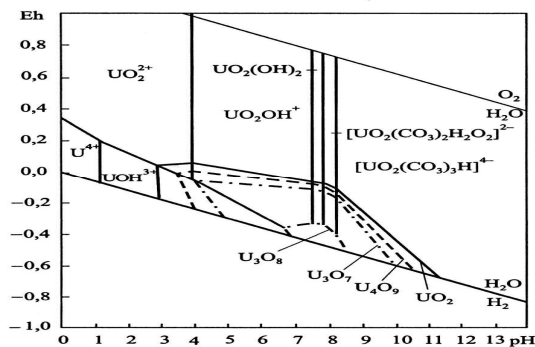
Ядерная энергетика мощна, компактна и относительно мало загрязняет окружающую среду, в то время как объекты углеводородной энергетики занимают большие территории, сильно загрязняют окружающую среду, увеличивая парниковый эффект, в результате которого доля парниковых газов составит в конце 21 века 4 % [10, 17, 20]. Кроме того, запасы углеводородов ограничены и добываются они все с большим трудом и затратами с нарушением экологии. Однако ядерная энергия при нарушении принципов эксплуатации может быть весьма небезопасной. Чернобыльская и Фукусимская катастрофы произошли по вине «человеческого фактора»: из-за непродуманных экспериментов в Чернобыле и из-за недостаточной высоты защитной стенки от волны цунами в Японии. Имеются и жертвы и радиационное загрязнение значительных территорий. Но при этих катастрофах виновата не ядерная энергетика, а те, кто ее неумело эксплуатирует. Ведь известно, что больше всего человеческих жертв приносят автомобильные аварии – в несколько раз больше, чем вся энергетика (сотни тысяч погибших в мире за год). Но никто не считает виноватым в этом автомобиль! Во Франции более 80 % энергии уже несколько десятилетий дает ядерная энергетика. В мире она давала около 25 % всей энергии для цивилизации, а ее перспективы практически неограниченны. Сейчас многие страны временно отказались от ядерной энергетике, хотя Китай и Индия ее развивают. Широко развернутая в мире компания

против ядерной энергетики, скорее всего, преследует не гуманные цели, а отражает конкурентную борьбу с ядерной энергетикой со стороны хозяев углеводородной энергетики. Однако человеческая цивилизация не сможет обойтись без ядерной энергетики, за которой будущее. В целом можно согласиться с прогнозом В.И. Вернадского относительно большой перспективности ядерной энергетики, а также о необходимости строго соблюдать при этом правила техники безопасности.

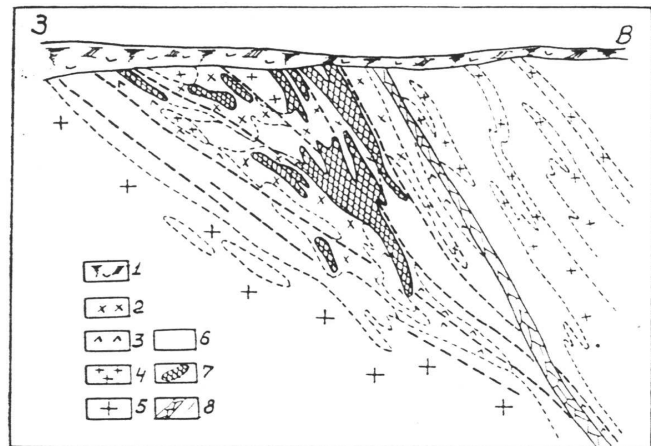
### О генезисе уранового оруденения

*«Урановые месторождения можно свести на две основные группы: 1) урановые выделения, связанные с гранитами; 2) месторождения урана в осадочных породах – в песчаниках и углистых скоплениях. Все эти месторождения всегда наблюдались в областях земной коры с очень сильно нарушенной тектоникой и уран в них находился в теснейшем парагенезисе с другими элементами – ванадием и углеродом» [2].*

Открытые в середине XX века крупные позднепротерозойские урановые месторождения на Украине преимущественно залегают в виде метасоматических тел альбититов в зонах тектонических нарушений среди гранитов (в Кировоградском районе) и среди пород криворожской железорудной формации (в Желтореченском районе) [22], которые выклиниваются с глубиной. В кайнозойских бучакских песках разведаны гидрогенные рудопроявления и месторождения урана, в которых настуран приурочен к углистым скоплениям. Известно, что в окислительной обстановке шестивалентный уран растворяется в воде в виде гидроксидных или карбонатных ионов, а выпадает четырехвалентный уран в осадок в восстановительной обстановке в виде оксида – уранитита (рис. 4). Реакция выщелачивания натрия из пород в водный раствор происходит при низких температурах и в кислотной обстановке. Поскольку глубинные флюиды имеют восстановительную реакцию, то наиболее вероятным генезисом альбититовых урановых руд является инфильтрация богатых кислородом океанических вод в позднем протерозое по разломно-трещинным зонам на глубину 3—5 км и более (рис. 4—6) [7, 8, 10—12, 21]. Это также подтверждается тем, что флюид газовой-жидких включений в альбитит-урановых рудах близок по изотопному составу к метеорным водам [21, 22, 29].



**Рис. 4.** Поля устойчивости урановых оксидов разной степени окисленности и ионов урана в карбонатных растворах ( $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{\text{CO}_2} = 10^{-3,4}$  атм.; суммарная активность ионов урана в растворе  $10^{-6}$  г-ион $\times$ дм $^{-3}$ ) [30]

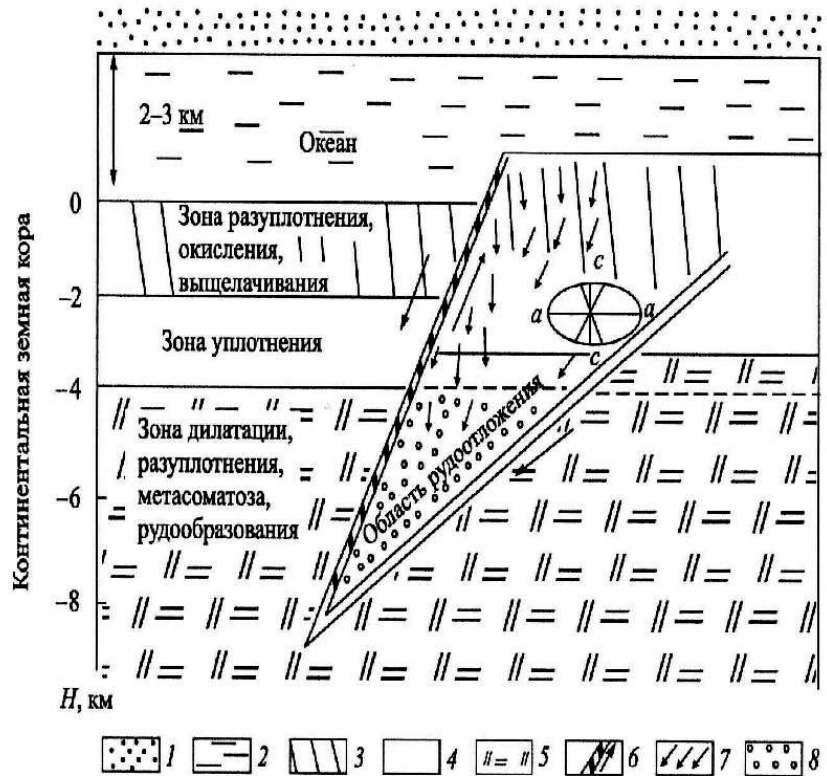


**Рис. 5.** Схематический геологический разрез Мичуринского уранового месторождения [22]

Именно поздний протерозой с возрастом 1,75—1,85 млрд лет назад является самой благоприятной эпохой формирования инфильтрационных богатых урановых месторождений альбититового типа, поскольку в это время совпадают несколько условий: 1) наличие кислого океана и кислородной атмосферы; 2) перерыв в магматической активизации между плутонами кировоградских гранитов, завершившихся региональным метаморфизмом (около 2 млрд лет), и гранитами коростенского комплекса (1,75 млрд лет назад), т.е. на период относительного покоя в эволюции континентальной земной коры Украинского щита



[7—12, 21]. Надо отметить, что со времен В.И. Вернадского представления о генезисе и прогнозировании уранового оруденения получили новое значительное развитие. Главным типом месторождений урана для Украинского щита являются уран-альбититовые позднепротерозойские метасоматиты среди гранитов и пород железисто-кремнистой формации [10, 12, 22]. Эти месторождения достаточно крупные и они стали основой послевоенной базы урановой промышленности СССР, а также рудной базой ядерной энергетики Украины. Хотя проблемы генезиса этих месторождений еще остаются [7—12, 21].



**Рис. 6.** Принципиальная модель инфильтрационного генезиса позднепротерозойских альбит-урановых месторождений Украинского щита [10, 12].

**Выводы**

В виде комментариев и дискуссии обсуждены представления академика В.И. Вернадского по таким актуальным проблемам геохимии окружающей среды как геохимия живого вещества; постоянство массы живого вещества; возникновение жизни и проблема абиогенеза; геохимия техногенеза; геохимия изотопов; развитие ядерной энергетики; генезис уранового оруденения. В.И. Вернадский внес важный вклад в решение обсуждаемых проблем, однако не со всеми его выводами можно согласиться.

Наиболее дискуссионными, с нашей точки зрения, являются представления В.И. Вернадского о роли жизни при формировании атмосферы и земной коры. Он, например, считал, что: 1) «...наш воздух (свободные кислород, азот, также  $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ) есть создание жизни»; 2) «масса живого вещества является планетной константой со времени архейской эпохи...»; 3) «...зеленые хлорофильные организмы являются главным механизмом биосферы, который улавливает солнечный луч и создает фотосинтезом химические тела, энергия которых в дальнейшем является источником действенной химической энергии биосферы, а в значительной мере – всей земной коры».

В то же время известно, что в архее только сформировалась континентальная земная кора при кристаллизации плагиогранитовой магмы и теплогенерации в ней на порядок большей, чем в современной коре. Температура на поверхности земной коры в архее была выше критической температуры воды ( $374\text{ }^\circ C$ ) и опустилась до нормальной лишь в рифее, а вода океана имела сильно кислую реакцию, о чем свидетельствует отложение нижнерифейских овражских кварцитов. Естественно, такие условия неблагоприятны для жизни. Кроме того, фитобактерии и зеленые растения сочетают в себе свойства анаэробов и аэробов и являются более сложными организмами, нежели первые простейшие аэробные хемобактерии. Имеется также целый ряд абиогенных химических реакций, по которым об-

разується вільний кисень (наприклад, по реакції між постмагматичним хлором і рідиною водою), а також реакції з виділенням азоту і інших атмосферних газів. Геологічна еволюція супроводжується збільшенням досконалості живих організмів і маси живої речовини. Тому не можна погодитися з висновком В.І. Вернадського про постійність маси живої речовини в процесі геологічної еволюції, а тим більше з архею.

Про геохімію ізотопів гіпотеза В.І. Вернадського про здатність живих організмів розкладати суміші ізотопів і вибирати з них переважно легкі ізотопи підтверджується. Однак обмін речовин з участю різних ізотопів визначається не фізичними властивостями атомів, а термодинамікою реакцій з участю молекул важких і легких ізотопів. Наприклад, вода є розчином молекул легкої і важкої води, причому вміст останньої збільшується від пари до рідини, в окислювальній і лужній обстановці. Особливо бідна на дейтерій вода в атмосфері водню, метану і в асоціації з органічними речовинами. В живому організмі обмін речовин відбувається з помітним виносом важких ізотопів оксидів і збагаченням їх легкими ізотопами. Логічно передбачити, що чим здоровіше організм людини і енергійніше в ньому проходять реакції окислення органічних продуктів харчування, тим більш інтенсивно відбувається збагачення тканин організму легкими ізотопами.

Відносно походження уранових родовищ логічно представити таку модель. Оскільки уран переноситься лише в окислювальних умовах, а глибинні флюїди мають відновлювальну реакцію, то найбільш ймовірно походження альбітиту-уранових родовищ є інфільтрація багатих киснем кислих океанічних вод в пізньому протерозої по розломно-тріщинним зонам на глибину 3—5 км і більше, де уран відкладається в відновлювальних умовах. Це також підтверджується тим, що флюїди газоподібних включень в альбітиту-уранових рудах близькі за ізотопним складом до метеоритних вод.

1. *Вибрані наукові праці академіка В.І. Вернадського*. – Т. 4: Геохімія живої речовини. – Кн. 1. / Ред. кол.: І.А. Акімов (голова), Е.В. Соботівич, А.М. Голубець та ін. – Київ, 2012. – 504 с.
2. *Вибрані наукові праці академіка В.І. Вернадського*. – Т. 4: Геохімія живої речовини. – Кн. 2. / Ред. кол.: Е.В. Соботівич (голова), І.А. Акімов, А.М. Голубець та ін. – Київ, 2012. – 582 с.
3. *Вибрані наукові праці академіка В.І. Вернадського*. – Т. 7: Праці з геохімії та радіогеології. – Кн. 1 / За ред. Е.В. Соботівича, В.В. Доліна, Г.М. Бондаренка, Р.Я. Бєльцева. – Київ, 2012. – 821 с.
4. *Вибрані наукові праці академіка В.І. Вернадського*. – Т. 7: Праці з геохімії та радіогеології. – Кн. 2 / За ред. Е.В. Соботівича, В.В. Доліна, Г.М. Бондаренка, Р.Я. Бєльцева. – Київ, 2012. – 665 с.
5. *Бєльцев Р.Я., Ковалюх Н.Н., Спивак С.Д.* Термодинаміка біогеохімічних реакцій при глибинному гіпергенезі гранітів // *Мінерал. журн.* – 2004. – 26, № 2. – С. 35—38.
6. *Наумов Г.Б., Рьженко Б.Н., Ходаковський І.Л.* Справочник термодинамічних величин. М.: Атомиздат, 1971. – 239 с.
7. *Бєльцев Р.Я.* Походження і еволюція зовнішніх геосфер: газової атмосфери, кислого океану, вільного атмосферного кисню і виникнення життя // *Доп. НАН України*. – 2011. – № 12. – С. 83—90.
8. *Бєльцев Р.Я.* Походження і термодинамічна еволюція зовнішніх геосфер // *Геофіз. журн.* – 2012. – 34, № 2. – С. 49—59.
9. *Бєльцев Р.Я., Бухарев С.В., Коломиец Г.Д.* Концепція плутонічного формування континентальної земної кори Українського щита // *Мінерал. журн.* – 2000. – 22, № 2/3. – С. 118—131.
10. *Бєльцев Р.Я., Бойченко С.Г., Спивак С.Д. і др.* Термодинаміка газового обміну в оточуючій середовищі. – Київ: Наук. думка, 2007. – 247 с.
11. *Бєльцев Р.Я., Шестопалов В.М., Спивак С.Д. і др.* Геохімія літогенезу овражних кварцитопесчаніків рифею // *Пошукова та екологічна геохімія* – 2010. – № 1 (10). – С. 22—41.
12. *Бєльцев Р.Я., Бєльцев А.Р., Спивак С.Д. і др.* Походження і прогнозування золотого і уранового родовища в докембрії Українського щита // *Пошукова та екологічна геохімія*. – 2011. – № 1 (11), С. 66—78.
13. *Всехсвятський С.К.* Космогонія Сонячної системи // *Проблеми сучасної космогонії* / Ред. В.А. Амбарцумян. – М.: Наука, 1972. – С. 316—413.
14. *Добрецов Н.Л.* Введення в глобальну петрологію. – Новосибірськ: Наука, 1980. – 200 с.
15. *Мейсон Б.* Основи геохімії. – М.: Недра, 1971. – 311 с.

16. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдасов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. – М.: Наука, 1990. – 182 с.
17. Щербак Н.П. Владимир Иванович Вернадский. – Киев: Наук. думка, 1988. – 106 с.
18. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. – М.: Прогресс, 1986. – 431 с.
19. Полинг Л. Общая химия. – М.: Мир, 1974. – 846 с.
20. Соботович Е.В., Белевцев Р.Я. Ядерна енергетика і наслідки Чорнобильської катастрофи // Вісник Національної академії наук України. – 2009. – № 4. – С. 29—39.
21. Белевцев Р.Я. О термодинамическом анализе изотопного обмена в воде гидросферы и земной коры // Доп. НАН України. – 2013. – № 9. – С. 108—114.
22. Белевцев Я.Н., Коваль В.Б., Бакаржиев А.Х. и др. Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины. – Киев: Наук. думка, 1995. – 396 с.
23. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтяной геологии. – М.: Недра, 1973. – 384 с.
24. Соботович Э.В., Бартицкий Е.Н., Цюнь О.В., Кононенко Л.В. Справочник по изотопной геохимии. М.: Энергоиздат, 1982. – 220 с.
25. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Отв. ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1978. – Т. 1, кн. 2. – 327 с.
26. Долін В.В., Пушкаръов О.В., Шраменко І.Ф. та ін. Третій у біосфері. – Київ: Наук. думка, 2012. – 223 с.
27. Эберт Г. Краткий справочник по физике. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 552 с.
28. Тейлор Х.П. Применение изотопии кислорода и водорода к проблеме гидротермального изменения вмещающих пород и рудообразования // Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. – М.: Мир, 1977. – С. 213—295.
29. Фомин Ю.А. Изотопный состав компонентов флюидных включений в месторождениях золота и урана докембрия Украинского щита // Зб. наук. праць ІГНС НАН України. – 2012. – Вип. 20. – С. 11—29.
30. Дроздовская А.А., Мельник Ю.П. Термодинамический анализ устойчивости оксидов урана в низкотемпературных карбонатных водах // Атомн. енергія. – 1967. – 22, вып. 5. – С. 407—428.

## **Белевцев Р.Я. В.И. ВЕРНАДСЬКИЙ ПРО ГЕОХІМІЮ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

*У статті наведено основні наукові висновки академіка В.І. Вернадського, опубліковані в нових виданнях його вибраних наукових праць, що стосуються геохімії навколишнього середовища (у вигляді цитат) і додаються до них авторські коментарі з обговоренням їх у світлі розвитку науки на сучасному рівні. Зокрема, розглядаються актуальні проблеми з геохімії живої речовини; постійність маси живої речовини; виникнення життя і процесу абіогенезу; геохімії техногенезу; геохімії ізотопів; ядерної енергетики; генезису уранового зруденіння. Підкреслено безперечний важливий науковий внесок В.І. Вернадського у вирішення цих проблем і його найбільш дискусійні уявлення про вирішальну роль життя при формуванні атмосфери (особливо вільного кисню), а також про постійність маси живої речовини з часу архейської епохи.*

## **Belevtsev R.Ya. V.I. VERNADSKY ABOUT GEOCHEMISTRY OF ENVIRONMENT**

*The article presents the basic conclusions of academician V.I. Vernadsky published in new editions of his selected scientific works dealing with environmental geochemistry (in form of quotations). The author gives his comments in the light of modern science advancement, in particular, on vital problems in geochemistry of the living matter, living matter mass constancy, archebiosis and abiogenesis process, geochemistry of technogenesis, isotope geochemistry, nuclear power engineering, and uranium contamination genesis. Significant scientific contribution of V.I. Vernadsky into solving of the above problems and his most controversial views on the crucial role of life in formation of atmosphere (particularly free oxygen), as well as living matter mass constancy since archean era are emphasized.*