



## КАРЕЛЬСКИЙ ИЗОТОПНЫЙ ФЕНОМЕН: НЕРАЗГАДАННАЯ ТАЙНА

Д. г.-м. н. Я. Э. Юдович  
yudovich@geo.komisc.ru

В 1989 г. карельские друзья передали мне уникальную коллекцию карбонатов, представляющую полный разрез Карельского комплекса — от его основания, т. е. границы с верхним археем (~2.6 млрд лет), до веписького надгоризонта в его верхах, т. е. до границы с рифеем (в одних схемах) или с акитканием (в схеме Л. И. Салопа) — 1.9 млрд лет. Всего нами было изучен 31 образец, для 25 из которых **Николаем Владимировичем Сухановым** были в лаборатории нашего института сделаны изотопные анализы — определения величин  $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$  и  $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ . Ни я, ни Коля Суханов (ныне прославившийся замечательными раскопками своей родословной!) тогда и думать не могли, какие удивительные следствия будет иметь эта работа.

### Сенсационные результаты ... и потеря приоритета

Когда я получил и обработал анализы, обнаружилась удивительная картина: резко аномальные составы карбонатного углерода. В «подшунгитовых» строматолитовых карбонатах (доломитах и доломитовых известняках) онежского горизонта (верхнего ятулия) углерод оказался необыкновенно тяжелым — величина  $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$  (PDB) была резко сдвинута в область плюсовых значений и достигала фантастической величины +18 %! Такое рекордно высокое значение было зафиксировано в образце чистого доломита под номером 2468, по всем другим показателям (MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, нерастворимый остаток) ничем особенным не выделявшемся (см. рисунок).

Однако важен был не только и даже не столько этот мировой рекорд (хотя столь высоких значений в литературе по древним карбонатам еще не публиковалось), сколько тот факт, что ВСЕ СЕМЬ образцов, представлявших «подшунгитовые» карбонаты онежского горизонта, оказались с аномально тяжелым углеродом: от +5.6 до +18.0 %, а если отбросить первую цифру (самые верхи онежского горизонта), то получим в среднем +12.8 %.

Выше, в шунгитоносной толще за онежского горизонта, по анализам 15 образцов картина получилась совер-

шенно иной, но также резко аномальной: в пяти образцах углерод был утяжелен (от +1.5 до +7.9 %), а в десяти — наоборот, облегчен, причем сильно: от -2.0 до -10.8 %. Таким образом, здесь изотопный состав  $\text{C}_{\text{карб}}$  обнаружил мощную дисперсию с разбросом значений, равным 18.7 %!

Понимая всё значение этих данных, я быстро сочинил статью и послал ее в «Доклады АН» — академику А. Л. Яншину. К великому сожалению, Н. П. Юшкин тогда еще не был академиком, и все мы, его сотрудники, были в отношении ДАН «беспризорниками». В былое время, когда был жив **Владимир**

**Иванович Смирнов** (у которого я когда-то учился), я отправлял статьи в ДАН на его имя, и они без проблем выходили. Но к этому времени В. И. умер, и я рискнул обратиться к А. Л. Яншину, с которым ранее никаких дел не имел. Академику, безмерно перегруженному десятком своих разнообразных должностей, очевидно, было недосуг вчитаться в статью и осознать, что речь идет о крупной научной сенсации. Только через полгода он вернул мне статью, посоветовав послать ее в «Геохимию» (мотив отклонения я сейчас уже и не вспомню — так я был расстроен). Делать нечего, статья была отправлена по новому адресу, пролежала положенное время и была напечатана в № 7 «Геохимии» за 1990 г. Однако, открыв свежий выпуск РЖ «Геология», я понял, что мы потеряли приоритет открытия самого высокого значения  $\text{C}_{\text{карб}}$  — оказывается, американцы нас уже опередили. Их статья была опубликована как раз в тот период, когда наше сообщение покоилось в портфеле акад. А. Л. Яншина...

### Предыстория 1: открытие Манфреда Шидловского

Если найденное нами в онежских карбонатах рекордно-высокое значение величины  $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$  было в самом деле уникальным, то *сам факт того, что в карелидах Земли попадают карбонаты с тяжелым углеродом*, был известен уже 15 лет. В 1975 г. знаменитый германский геохимик Манфред Шидловский, которому, по предложению Н. П. Юшкина, в нашем институте даже посвятили специальную брошюру [10], опубликовал с соавторами мощную статью, посвященную изотопии докембрийских карбонатов [16]. В числе прочего в ней сообщалось об обнаружении изотопно-тяжелого  $\text{C}_{\text{карб}}$  в доломитах Ломагунди (Родезия, ныне Зимбабве). По анализам 11 образцов средние значения величины  $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$  составили  $+9.4 \pm 2.0$  %, с разбросом значений от +7.3 до +13.4 %. Подивившись этим цифрам, немецкие ученые в том же году расширили коллекцию и, сделав анализы уже не 11, а 67 образцов, получили среднее чуть пониже, но также со-

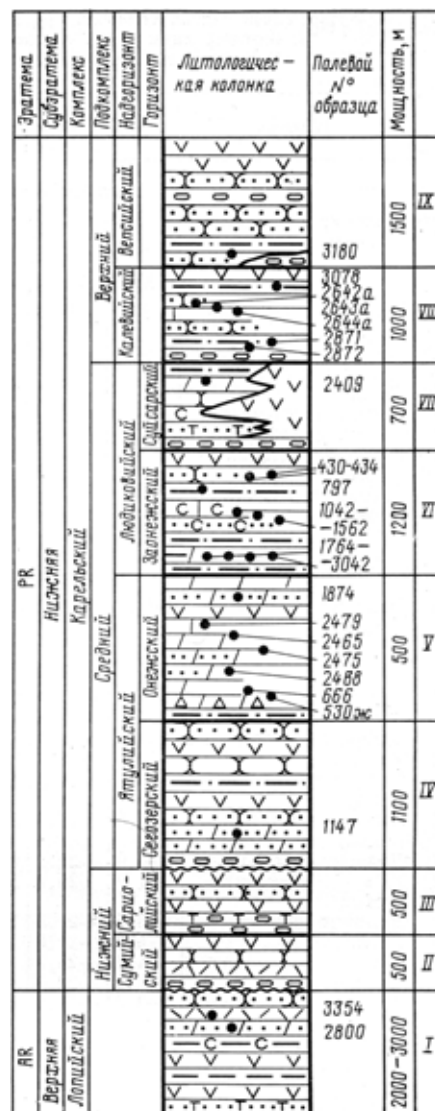


Схема опробования карбонатных пород (и карбонатных цементов терригенных пород) Карельского комплекса [14, с. 973]



вершенно аномальное:  $+8.2 \pm 2.6 \text{ ‰}$  [17].

Если в своей первой публикации они об этих цифрах упомянули как бы вскользь, упирая в основном на постоянство средних значений  $\delta^{13}C_{\text{карб}}$  в докембрии и их близость к фанерозойскому (общее среднее по 260 образцам составляло всего лишь  $+0.4 \pm 2.7 \text{ ‰}$ ), то здесь они уделили открытому феномену более серьезное внимание. Было подчеркнuto, что выходы доломитов Ломагунди простираются на расстояние почти 300 км, и, следовательно, эта формация представляет *уникальную карбонатную провинцию Земли* — с аномально тяжелым углеродом. Рассмотрев возможные причины обнаруженного феномена, они пришли к выводу о том, что утяжеление  $C_{\text{карб}}$  произошло вследствие накопления карбонатных осадков в стагнированном эвапоритовом бассейне — за счет избирательного извлечения из воды легкого углерода в состав органического вещества [17].

Спустя 18 лет к такому же выводу пришли и наши геологи из ВСЕГЕИ (А. М. Ахмедов, В. А. Крупеник) и Института геологии Карельского НЦ (В. В. Макарихин, П. В. Медведев), изучившие большую коллекцию карбонатов этого возрастного интервала, собранную в Карелии и на Кольском полуострове [1]. Особенно убедительным подтверждением «эвапоритовой» модели они сочли зависимость значений  $\delta^{13}C_{\text{карб}}$  от реконструированной ими *фациальной зональности* онежской и заонежской толщ. Там, где у них рисовались более мелководные обстановки типа сабкхи (и где, следовательно, эвапоритовый процесс протекал интенсивнее), фиксировались и наиболее позитивные значения  $\delta^{13}C_{\text{карб}}$  [1, с. 42].

### Обобщение–1988

Понимая значимость своего открытия, но будучи заядлым «униформистом», М. Шидловский все же старался подчеркнуть *локальность* утяжеления карбонатного углерода на стратиграфическом уровне Ломагунди: вследствие местной специфики фациальных условий в Африке якобы произошло некое *локальное* отклонение, которое не может смазать величественной общей картины (в духе Вернадского) — неизменности углеродного цикла на Земле по крайней мере 3.5 млрд лет, с момента появления жизни (потом он будет отодвигать эту дату все дальше — вплоть до почти 4 млрд лет [10, с. 10]).

Нас же больше заинтересовал как

раз аномальный феномен, а не униформистская гармония. Поэтому в 1988 г. мы обобщили немногие имевшиеся тогда данные по изотопии  $C_{\text{карб}}$  в карбонатах карельского уровня и пришли к выводу о *глобальном распространении феномена тяжелого  $C_{\text{карб}}$  на карельских кратонах*. Оказалось, что ученые в разных концах света сообщали очень похожие данные. Например, тяжелый углерод нашли в карбонатах Балтийского (до  $+8.6 \text{ ‰}$ ) и Украинского (до  $+8.2 \text{ ‰}$ ) щитов, в Канаде и Индии (до  $+6 \text{ ‰}$ ) [13, с. 236]. Согласно последнему по времени обобщению петербургских и карельских геологов, «с учетом дисперсии хронологических данных, обусловленных различными причинами ... выделяется аномалия изотопно-тяжелого карбонатного углерода в интервале 2.25–2.1 млрд лет» [1, с. 47].

### Предыстория 2: облегчение шунгитового углерода

В те годы в нашем институте еще не умели определять изотопный состав органического углерода —  $C_{\text{орг}}$ . Между тем для построения моделей, способных объяснить феномен тяжелого  $C_{\text{карб}}$ , необходимо было иметь и данные по углероду органическому, или «восстановленному» —  $C_{\text{в}}$ , если кому-то слово «органический» не нравится [6]. (На самом деле слово правильное, только не надо отождествлять «органический» с «биогенным» — это отнюдь не одно и то же. Например, в углистых хондритах присутствует  $C_{\text{орг}}$ , но он — абиогенный!).

Поэтому для выяснения изотопного состава  $C_{\text{орг}}$  в шунгитоносной толще пришлось прибегнуть к литературному опросу. Задача облегчалась тем, что такой опрос был уже сделан московским биологом А. А. Иевлевым в 1986 г. [5] и затем нами в 1988 г. [12]. *В этом опросе выяснилось, что на данном стратиграфическом уровне глобально проявилось аномальное облегчение органического углерода!* Так, во фрунзенской серии УКЩ значения  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  доходили до  $-39.8 \text{ ‰}$ , в серии Франсвилль в Габоне (~2.1 млрд лет) достигали фантастического значения  $-45 \text{ ‰}$  [15], в самой шунгитовой толще, по Л. П. Галдобинной (источник данных у нее указан неясно), до  $-42 \text{ ‰}$ . Добавим к этому, что совсем недавно в докладе петербургских исследователей на II Российском совещании по органической минералогии была приведена картинка, где в подошве заонежской шунгитоносной толщи — в скв. 4191 на пл. 1250 м

— зафиксировано значение  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  около  $-40 \text{ ‰}$  [6]. Как еще в 1986 г. заключил А. А. Иевлев, *именно на шунгитовую эпоху приходится самый глубокий минимум значений  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  в истории Земли, составляющий в среднем около  $-40 \text{ ‰}$* .

### Две модели, из которых одна — фантастическая...

Для истолкования наблюдаемых аномалий мы рассматривали в 1990 г. две модели: «резервуарную» и «метановую» [14].

#### Резервуарная модель

Как известно, в стратиффере фанерозоя средние массы  $C_{\text{орг}}$  и  $C_{\text{карб}}$  относятся как 0.18:0.82 — это знаменитое «соотношение А. Б. Ронова», установленное им со своим коллективом в результате многолетних кропотливых подсчетов объемов осадочных пород в осадочной оболочке [7]. Именно при таком соотношении масс восстановленного (органического) и окисленного (карбонатного) углерода устойчиво выдерживаются их средние изотопные составы относительно чикагского стандарта PDB:  $\delta^{13}C_{\text{карб}} = 0$ ,  $\delta^{13}C_{\text{орг}} = -25 \text{ ‰}$ . Такое отношение возникает при диспропорционировании изотопов углерода мантийного  $CO_2$ , поступающего в биосферу со средним значением  $\delta^{13}C$  около  $-4.5 \text{ ‰}$ . Живое вещество, как это гениально предвидел Вернадский, при фотосинтезе селективно обогащается легким изотопом  $^{12}C$ , за счет чего в оставшемся в биосферном резервуаре  $CO_2$  накапливается тяжелый изотоп  $^{13}C$ , который затем фиксируется в карбонатах.

**Ввиду постоянства изотопного состава первичного органического углерода, определяемого стабильными биохимическими процессами фотосинтеза, всякое изменение соотношения масс  $C_{\text{орг}}/C_{\text{карб}}$  обязательно приведет к изменению изотопного состава  $C_{\text{карб}}(x)$ :**

$$CO_2, \delta^{13}C_{\text{карб}} = -4.5 \text{ ‰} \rightarrow C_{\text{орг}}, \delta^{13}C = -25 \text{ ‰} \\ C_{\text{карб}}, \delta^{13}C = x \text{ ‰}$$

На этом и основана резервуарная модель. Например, несложный расчет показывает, что для создания наблюдаемого среднего изотопного состава  $C_{\text{карб}}$  в доломитах Ломагунди биосферное отношение  $C_{\text{орг}}/C_{\text{карб}}$  должно было составлять не 0.18/0.82, а примерно 0.50/0.50, т. е. органическое вещество (ОВ) должно было фоссилизироваться примерно в 2.8 раза интенсивнее, чем в фанерозое. Еще сильнее этот сдвиг должен был быть в онежских



слоях, для которых получается отношение  $C_{орг}/C_{карб} = 0.54/0.46$ .

Что ж, прекрасно, — в шунгитовой толще действительно захоронены уникально крупные массы органического углерода. Но где же эти громадные массы фоссилизированного ОВ в *подшунгитовой толще* строматолитовых доломитов? Их там нет! Доломитовая толща содержит необыкновенно тяжелый углерод, а *комплементарных масс*  $C_{орг}$  здесь нет и в помине!

Поэтому, чтобы применить резервуарную модель и для онежских доломитов, мы должны придумать нечто фантастическое — достойное пера Станислава Лема. Мы должны допустить, что в дошунгитовую эпоху в онежских бассейнах карбонатной седиментации обитала бессмертная биота, причем в огромном количестве. То есть биота жила, фотосинтезировала, селективно поглощая положенное количество легкого изотопа  $^{12}C$  ... но не умирала, а лишь плодилась и размножалась, и так продолжалось вплоть до шунгитовой эпохи, когда эта биота почему-то стала в массовом количестве отмирать и фоссилизироваться, формируя огромные запасы шунгитового углерода.

Правда, можно выдвинуть альтернативу: биота-де была и процветала, в положенный срок отмирала, но в аридных обстановках теплых озер после отмирания не фоссилизировалась, а нацело разлагалась, отдавая  $CO_2$  с легким углеродом в гидросферу и атмосферу. Но в таком случае ничто не помешало бы сформироваться и легкому растворенному бикарбонату  $H^{12}CO_3^-$ , и мы неизбежно наблюдали бы в онежской подшунгитовой толще и карбонаты с легким углеродом — но их здесь нет.

Казалось бы, сокрушительное возражение против фантастической идеи бессмертия биоты — наличие в стратифере более древних толщ графитовых гнейсов и сланцев. Выходит, что  $C_{орг}$  фоссилизировался по крайней мере уже за 1 млрд лет до шунгитовой эпохи — даже в раннем архее, не говоря уже о позднем [13, с. 30—36]. А это значит, что биота научилась умирать давным-давно... Однако зададимся вопросом: *какая именно биота?* Ответ известен — прокариотная. Общепринято, что как раз до шунгитовой эпохи в биосфере Земли обитали только прокариоты.

Именно в районе нижнего рубежа шунгитовой эпохи, т. е. где-то около границы онежской и ладожской серий по-старому [8]) или ятулия/людиковия по-новому, в биосфере Земли появились эукариоты: «... многие данные свидетельствуют в пользу того, что в среднем мезопротозое\* произошло событие исключительной важности в эволюции органического мира, которое выразилось в появлении первых эукариотных форм жизни» [8, с. 167].

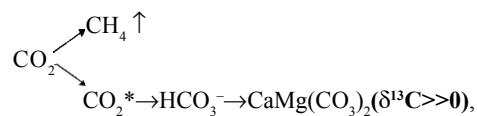
#### Метановая модель

Она выглядит гораздо привлекательнее, потому что способна объяснить не только утяжеление  $C_{карб}$ , но и аномальное облегчение  $C_{орг}$ . Дело в том, что в резервуарной модели никакое облегчение  $C_{орг}$ , большее предельного фотосинтетического ( $-25\%$ ), — объяснить невозможно. Даже в диагенетических конкреционных карбонатах, которые формируются едва ли не полностью за счет  $CO_2$ , генерируемого разлагающимся органическим веществом, значение  $\delta^{13}C_{карб}$  будучи всегда заметно пониженным, разумеется, никогда не достигает значения  $-25\%$ . Всякое облегчение  $C_{орг}$ , превышающее стабильную среднюю величину  $\delta^{13}C_{орг}$  зеленых растений-автотрофов, питающихся атмосферным (наземные) или водорастворенным (водные) углекислым газом, требует генерации  $CO_2$  за счет окисления углеводородов, обычно — метана. Именно метан обладает экстремально низким значением величины  $\delta^{13}C$ , в среднем  $-50\% \dots -70\%$ . В биохимических экспериментах получали значения  $-80\%$  и даже еще более низкие. Поэтому для шунгитонесной толщи резервуарная модель годится только отчасти: она может объяснить утяжеление  $C_{карб}$ , но не в состоянии объяснить облегчение  $C_{орг}$ , превышающее «фотосинтетическую норму» минус  $25\%$ . Однако с этим легко справляется метановая модель.

Генерация метана бактериями-метаногенами, восстанавливающими бикарбонат водородом, происходит по схеме:  $CO_2 + H_2O \Rightarrow HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \Rightarrow CH_4 + 3H_2O$

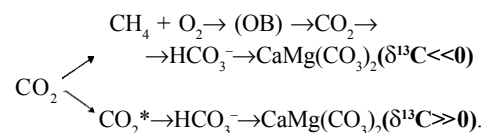
В свою очередь, появление бактериогенного метана ведет к сильному диспропорционированию изотопов угле-

рода при формировании карбонатов:



где звездочкой мы обозначили *остаточный* углекислый газ с изотопно-утяжеленным углеродом.

Вполне вероятно, что в заонежскую «шунгитовую» эпоху, когда на фоне мощного эффузивного и эксплозивного вулканизма быстро накапливались кремнистые, глинистые и карбонатные углеродистые толщи, *в диagenезе создавались строго анаэробные условия, при которых только и была возможна бактериальная генерация метана* [3]. Однако как раз к этому времени в атмосфере Земли появился свободный кислород [13, с. 234]. Это могло обеспечить деятельность *бактерий-метанотрофов* [3, с. 150], и таким образом в процессе карбонатообразования появилась и вторая ветвь, ведущая к формированию изотопно-легкого углекислого газа, а затем и карбонатов с изотопно-легким углеродом:



Кроме того, поскольку бактерии-метанотрофы использовали для строительства своих клеток метан, то они производили бактериальное ОВ с аномально легким углеродом — такое, которое невозможно получить ни в каком фотосинтезе. Это объясняет резкие изотопные аномалии  $C_{орг}$  в карельских черносланцевых толщах Земли (в частности, в шунгитовой толще Карелии).

*Таким образом, с помощью метаногенерации в шунгитовой толще можно непринужденно объяснить наличие в ней карбонатов и с аномально тяжелым, и с легким углеродом, и одновременно — присутствие аномально легкого шунгитового  $C_{орг}$ .*

Но годится ли метановая модель и для *подшунгитовых* онежских доломитов, что, в частности, предлагается петербургскими и карельскими геологами [1, с. 49—50]? Главное, что здесь смущает, — это уже упомянутое выше практическое отсутствие фоссилизированного ОВ в доломитах. А это значит, что для деятельности бактерий-метаногенов не было достаточного количества

\* Согласно периодизации Л. И. Салопа, мезопротозой — это то, что принято называть нижним протерозоем. Его стратотип — Карельский комплекс на Балтийском щите, Афебий в Канаде, парастратотип в Ю.Африке в составе серий Витватерсранд + Венгерсдорп + Трансвааль + Матсап, а также коррелятивные стратотипы в США, Австралии и Бразилии [8, с. 160—161]. И везде на ладожском (трансваальском) уровне разреза имеется черносланцевая (не обязательно шунгитовая!) толща возрастом 2.0—2.2 млрд лет.



субстрата. Действительно, все случаи доказанной генерации диагенетического метана зафиксированы только в углеродистых илах или в черносланцевых толщах [13, с. 212—215], на которые онежские строматолитовые доломиты совсем не похожи.

Не помогает делу и апелляция к эвапоритовым фациям, якобы создававшим плотностную стратификацию воды в лагунах, способствующую накоплению ОВ. Во-первых, повторяем, этого ОВ в доломитах просто нет... А, во-вторых, анализ таких, казалось бы, бесспорных эвапоритов, как «известняк с глиптоморфозами по галиту» [1, с. 44], показывает значение  $\delta^{13}C_{\text{карб}}$  всего лишь +2.1 ‰. Очевидно, это и есть то утяжеление, которое мог бы создать эвапоритовый процесс сам по себе. В такой классической эвапоритовой толще, как верхнепермский цехштейн Германии, диапазон значений  $\delta^{13}C_{\text{карб}}$  все-таки гораздо ниже, чем в онежских доломитах: от +5 до +7 ‰ [1, с. 40]. Между тем, в онежском горизонте нет даже сульфатов (не говоря уже о галите) и весьма убоги содержания в доломитах Mn, Sr, B [1, с. 26] — характерных элементов-индикаторов эвапоритовых фаций [11]. Это значит, что образование онежских строматолитовых доломитов в лучшем случае отвечало только самой начальной стадии эвапоритизации, которая едва ли могла породить столь сильные утяжеления карбонатного углерода.

#### **Заключение, оставляющее одну тайну нераскрытой**

Итак, изложенное выше позволяет сделать выводы, которые отчасти уже не новы, но вместе с тем вновь поставить вопрос, который казался уже окончательно решенным [1].

1. В средней части Карельского комплекса возрастом примерно 2.1—2.2 млрд лет выявлена изотопная аномалия карбонатного углерода, прослеженная практически во всех карельских (мезопротозойских по Л. И. Салопу [8]) толщах Земли. Эта *глобальная аномалия*, выраженная как нормированная по чикагскому стандарту PDB величина изотопного уплотнения  $\delta^{13}C_{\text{карб}}$ , составляет в среднем около +8...+9 ‰. У онежских (подшунгитовых) строматолитовых доломитов в карельском стратотипе средняя величина  $\delta^{13}C_{\text{карб}}$  еще выше и близка к +12...+13 ‰.

2. Поскольку формирование изотопно-аномальных онежских доломитов (и таких же карбонатов в других частях све-

та) не сопровождалось массовой фоссилизацией органического вещества, постольку обе известные теоретические модели, объясняющие данную аномалию (резервуарная и метановая), явно не годятся. Не убедительна и принимаемая большинством исследователей эвапоритовая модель, поскольку в ней тоже предполагается увод значительных масс легкого углерода  $^{12}C$  в органическое вещество.

3. Предложено фантастическое, но теоретически возможное объяснение — поглощение  $^{12}C$  «бессмертной» биотой, которая не фоссилизировалась. Однако эта идея пока не имеет никаких подтверждений, кроме (принимаемого, кстати, не всеми) тезиса о том, что именно в это время в биосфере Земли появились эукариоты.

**Таким образом, данный изотопный феномен (глобальное утяжеление  $C_{\text{карб}}$  в подшунгитовых слоях) мы считаем необъясненным.**

4. В то же время изотопные аномалии углерода в шунгитоносной толще легко и непринужденно объясняются в терминах метановой модели.

Как известно, осадконакопление в рифтогенном Онежском бассейне проходило на фоне напряженного базальтового вулканизма, когда в морскую экосистему поступало большое количество эндогенного тепла,  $CO_2$  и «удобрений» — элементов-примесей [2, 9]. Эта мощная эндогенная подпитка стимулировала как интенсивные процессы фотосинтеза автотрофных водорослей, так и деятельность литотрофных (термофильных?) бактерий-метаногенов [3]. В осадках захоронялись огромные массы органического вещества, в диагенезе которых мог также генерироваться метан. Появление в это время свободного кислорода в атмосфере обеспечило деятельность бактерий-метанотрофов, вклад биомассы которых в фоссилируемое ОВ, по-видимому, был весьма значительным.

Всё это вело к трем следствиям, которые действительно наблюдаются: а) к формированию диагенетических карбонатов с облегченным углеродом из изотопно-легкого  $CO_2$ , получившегося при бактериальном окислении ОВ; б) к образованию диагенетических карбонатов с утяжеленным углеродом из изотопно-тяжелого  $CO_2$ , оставшегося после метаногенерации; в) к формированию новообразованного диагенетического ОВ с резко облегченным углеродом из клеток бактерий-метанотрофов.

#### Литература

1. Ахмедов А. М., Крупеник В. А., Макарихин В. В., Медведев П. В. Изотопный состав углерода в карбонатах раннепротерозойских бассейнов (Балтийский шит): Препринт докл. на зас. учен. совета Ин-та геол. Петрозаводск: Ин-т геол. КарНЦ РАН, 1993. 60 с.
2. Галдобина Л. П., Ковалевский В. В. Углерод Онежской структуры // Органическая минералогия: Матер. II Рос. совещ. по орг. минералогии. Петрозаводск: Рос. минерал. об-во и др., 2005. С. 47—49.
3. Заваззин Г. А. Бактерии и состав атмосферы. М.: Наука, 1984. 199 с.
4. Загнитко В. Н., Луговая И. П. Использование изотопов кислорода и углерода для решения некоторых проблем геологии докембрия Украинского щита // Геохимия и рудообразование, 1985. № 13. С. 45—52.
5. Иевлев А. А. Фракционирование изотопов углерода в живой клетке и этапы биологической эволюции // Ж. общ. биол., 1986. Т. 47. № 5. С. 601—613.
6. Лохов К. И., Полеховский Ю. С., Гусева Н. М. и др. Аномальные изотопные характеристики шунгитосодержащих пород базальной части заонежской свиты // Органическая минералогия: Матер. II Рос. совещ. по орг. минералогии. Петрозаводск: Рос. минерал. об-во и др., 2005. С. 51—53.
7. Ронов А. Б. Осадочная оболочка Земли: Количественные закономерности строения, состава и эволюции. М.: ГЕОХИ АН СССР, 1980. 80 с.
8. Салоп Л. И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра, 1982. 343 с.
9. Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 280 с.
10. Шидловский М. Изотопная геохимия стратисферы и проблемы познания ранней стратисферы Земли: Сборник аннотаций и рефератов научных работ / Отв. ред. и авт. вступ. статьи академик Н. П. Юшкин. Ред.-составитель Я. Э. Юдович. Сыктывкар: Геопринт, 2000. 66 с.
11. Юдович Я. Э. Региональная геохимия осадочных толщ. Л.: Наука, 1981. 276 с.
12. Юдович Я. Э. Аномальное облегчение органического углерода в древних черных сланцах // Горючие сланцы, 1988. Т. 5. № 2. С. 147—151.
13. Юдович Я. Э., Кемпис М. П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.
14. Юдович Я. Э., Макарихин В. В., Медведев П. В., Суханов Н. В. Изотопные аномалии углерода в карбонатах Карельского комплекса // Геохимия, 1990. № 7. С. 972—978.
15. Schidlowski M. A 3800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks // Nature, 1988. Vol. 333. № 6171. P. 313—318.
16. Schidlowski M., Eichmann R., Junge C. Precambrian sedimentary carbonates: carbon and oxygen isotope geochemistry and implications for the terrestrial oxygen budget // Precambrian Res., 1975. Vol. 2. P. 1—69.
17. Schidlowski M., Eichmann R., Junge C. E. Carbon isotope geochemistry of the Precambrian Lomagundi carbonate province, Rhodesia // Geochim. Cosmochim. Acta, 1975. Vol. 40. P. 449—455.