

УДК 550.93:551.72(501.51)

**О ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОМ ЗНАЧЕНИИ Rb-Sr ИЗУЧЕНИЯ
ПРОТЕРОЗОЙСКИХ АРГИЛЛИТОВ АНАБАРСКОГО МАССИВА**

© 2003 г. В. И. Виноградов, В. И. Муравьев, М. И. Буйкайте

Геологический институт РАН, Москва

Поступила в редакцию 15.01.2002 г.

Ключевые слова. Протерозой, рифей, аргиллиты, Rb-Sr возраст, Анабарский массив.**ВВЕДЕНИЕ**

И.М. Гороховым с соавторами (2001) была опубликована работа, основанная на изучении Rb-Sr системы в глинистых породах верхнедокембрийских отложений на западном склоне Анабарского массива. Работа построена на блестящем экспериментальном материале, однако, его интерпретация представляется не совсем корректной. Ниже критически рассматриваются некоторые изложенные в этой статье положения.

Авторы исследовали две пробы аргиллитов из верхней, юсмастахской свиты рифейского разреза. Юсмастахская свита мощностью около 800 м почти целиком сложена доломитами и включает лишь редкие маломощные (десятки сантиметров) прослои терригенных, преимущественно глинистых пород. Последние приурочены к основанию верхней и нижней подсвит, которые с размывом залегают на нижележащих карбонатных отложениях. Именно из этих двух базальных прослоев отобраны обе исследованные пробы. Rb-Sr измерения проведены по выделенным из аргиллитов размерным глинистым субфракциям, которые прошли специальную предварительную обработку. Полученные результаты интерпретируются И.М. Гороховым и его соавторами в рамках изохронных построений. Однако используемая методология не всегда кажется обоснованной, что мы постараемся показать, опираясь на материалы статьи И.М. Горохова и др. (2001), а отчасти и более ранней работы по нижележащей усть-ильинской свите протерозойского чехла Анабарского массива (Горохов и др., 1997).

**ОСОБЕННОСТИ Rb-Sr ДАТИРОВАНИЯ
ОСАДОЧНЫХ ПОРОД**

Как известно, Rb-Sr методом датируется время, когда в изучаемой совокупности проб устанавливается одно и то же начальное изотопное отношение ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Механизмы такого уравно-

вешивания ясны далеко не всегда, но реальность их действия в природных обстановках не подлежит сомнениям.

Проще всего представить себе механизм усреднения изотопного состава Sr в тонкозернистой фракции осадка при аутигенном образовании глинистых минералов или их обмене со Sr морской воды, изотопный состав которого постоянен в течение времени осадконакопления. Идея определения времени осадкообразования по глинистым фракциям была высказана в 1966 г. М. Боном с сотрудниками (Клауэр, 1984). Она была подхвачена многими исследователями, вызвала всплеск работ и долгое время казалась весьма перспективной. Апологетом ее был, в частности, известный специалист по изотопному изучению глинистых фракций Н. Клауэр. По прошествии времени, однако, эта идея была оставлена, и мы приведем очень знаменательную, как нам кажется, цитату из работы Н. Клауэра с соавторами: "K-Ag и Rb-Sr системы осадочных пород и выделенных минеральных фракций использовались во многих исследованиях для определения времени их отложения, хотя такой подход представляется спорным. Несмотря на то, что остается неопределенность в отношении стратиграфического применения, было показано, что K-Ag и Rb-Sr системы особенно полезны для определения времени и в некоторых случаях продолжительности диагенетических процессов" (Clauser et al., 1992, p. 239).

Другой зафиксированный на многих примерах механизм усреднения изотопного состава Sr в осадке связан с достаточно хорошим перемешиванием материала осадка в ходе его транспортировки и накопления. В таком случае усреднение может происходить не в рамках всех или большинства размерных фракций осадка, а в пределах определенного его объема – в валовой пробе. Наиболее активно эта идея разрабатывалась У. Кордани (Cordani et al., 1978). На ряде примеров изучения глинистых пород, охватывающих время от позднего докембрия до юры, он показал хорошее соответствие измеренного и стра-

тиграфического возраста. Но и в этом случае, в конце концов, оказалось, что такие совпадения нужно считать скорее исключением, чем правилом.

Наконец, третий наблюдаемый механизм усреднения изотопного состава Sr в осадочной породе связан с процессами ее эпигенетического преобразования. Во многих случаях детали этого механизма требуют дополнительных специальных исследований, но сам факт возможности изотопного датирования этапов эпигенеза сомнений не вызывает. Именно об этом говорилось в приведенной выше цитате из работы Н. Клауэра с соавторами.

На изохронных диаграммах точки, которые удовлетворяют условиям изотопного датирования, лежат на прямой линии. В число условий получения изохронной зависимости, кроме равенства начального отношения ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ в образцах, входят закрытость системы относительно Rb и Sr и различия в отношениях Rb/Sr в анализируемых объектах. Все эти детали общеизвестны и приведены здесь с единственной целью – еще раз напомнить, что сколько-нибудь уверенное определение Rb-Sr возраста события по одному образцу невозможно. Нужно наличие по крайней мере двух, а для получения достоверных результатов не менее трех образцов. Они должны различаться по Rb/Sr отношениям, и чем это различие больше, тем с меньшими ошибками вычисляются параметры изохроны – возраста и начального изотопного отношения Sr. Трудность, однако, состоит в том, что выделенные из одного горизонта глинистые фракции одного и того же размера имеют, как правило, близкие Rb/Sr отношения и поэтому мало пригодны для определения возраста.

О внутренних изохронах

Между тем существует прием, который, казалось бы, решает проблему получения необходимого разброса точек на изохронной плоскости. Дело в том, что кроме Sr, входящего в кристаллическую решетку филлосиликата, небольшая часть его сорбируется на поверхности глинистых частиц или занимает какие-то другие положения вне прямой связи с самим минералом. В структуре слюды (мусковит, иллит) Sr может занимать позиции калия (рубидия), но такая замена уменьшает устойчивость структуры, поскольку эти элементы не изовалентны и имеют различные ионные радиусы.

Легко подвижный (обменный) Sr может быть извлечен из образца. Для этого используют такие слабые растворители, как ацетат аммония (Горохов и др. 1997, 2001) или 1N раствор HCl (во многих западных лабораториях). Rb, занимающий позиции калия в слюдах, значительно труднее переходит в раствор. Поэтому в вытяжке отношения

$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ оказываются низкими. Соответственно в остатке от выщелачивания эти отношения возрастает по сравнению с необработанным образцом. Таким образом, на изохронной диаграмме вместо одной точки, которая отвечает необработанному образцу, появляются две дополнительные точки. В соответствии с балансом масс эти три точки должны лежать на прямой линии, конечно при условии совершенства экспериментальной техники. Поскольку точка, отвечающая вытяжке, располагается близко к началу координат, ошибки при расчете координат прямой оказываются минимальными. В совокупности вся эта процедура и создает иллюзию точного определения возраста.

Прием, в основе которого лежит процесс выщелачивания, многократно рассматривался в литературе. Иногда он действительно дает значимый (и даже стратиграфически значимый) возраст, но в большинстве случаев полученные результаты оказываются просто неинтерпретируемыми (Clauer et al., 1990; Ohr et al., 1991; Виноградов, 1997). Дело в том, что легко извлекаемый из образца Sr может не иметь, и, видимо, иногда действительно не имеет никакого отношения к Sr, который жестко связан в кристаллической решетке минерала. Допущение, что будучи слабо связанным он сохраняется в породе в течение многих сотен миллионов лет и отражает среднюю осадконакопления или раннего диagenеза, кажется просто нелепым с позиций и литологии, и геохимии, и гидрогеологии.

В итоге искусный, но искусственный прием выщелачивания дает столь же искусственный способ расчета возраста, хотя получаемые в большинстве случаев значения кажутся вполне правдоподобными. Объясняется это следующими обстоятельствами. Как правило, отношения $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ в глинистых фракциях довольно высокие. В конкретных образцах в рассматриваемой статье (Горохов и др., 2001) они лежат в пределах от 14 до 70, а в вытяжках от 2 до 10. Таким образом, точки, которые отвечают вытяжкам на изохронной диаграмме, оказываются гораздо ближе к началу координат, чем точки глинистых фракций. Поэтому наблюдаемые относительно небольшие вариации отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в вытяжках не очень сильно отражаются на наклонах прямых (вычисляемом возрасте), которые задаются далеко отстоящими от начала координат точками, но зато обеспечивают очень малые ошибки вычисления наклона. Тем самым вычисляемый возраст может быть близким к некоторой реальности, но с совершенно нереальными, искусственно заниженными ошибками его расчета. Величина этих ошибок очень мало чувствительна к изменению изотопного отношения Sr в вытяжке. Так например, если измеренное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в вытяжке для какой-либо из фракций искусственно изменять даже на такую большую ве-

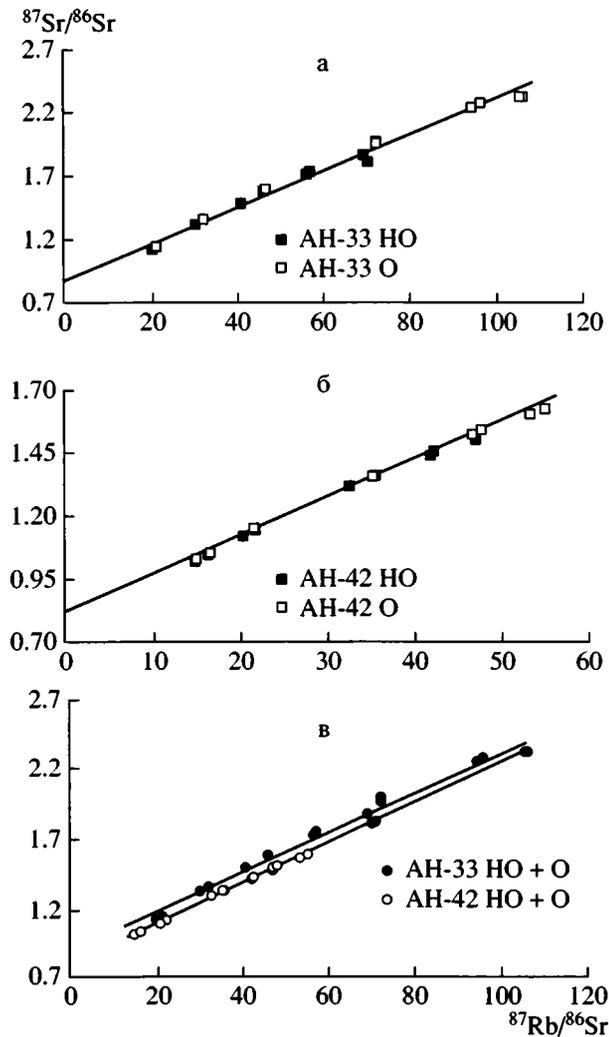


Рис. 1. Изохронные зависимости для необработанных (HO) и обработанных (O) размерных глинистых фракций из отложений юсмастакской свиты по данным И.М. Горохова и др., (2001). а, б – построение для каждого из образцов, в – обобщенный график для двух образцов.

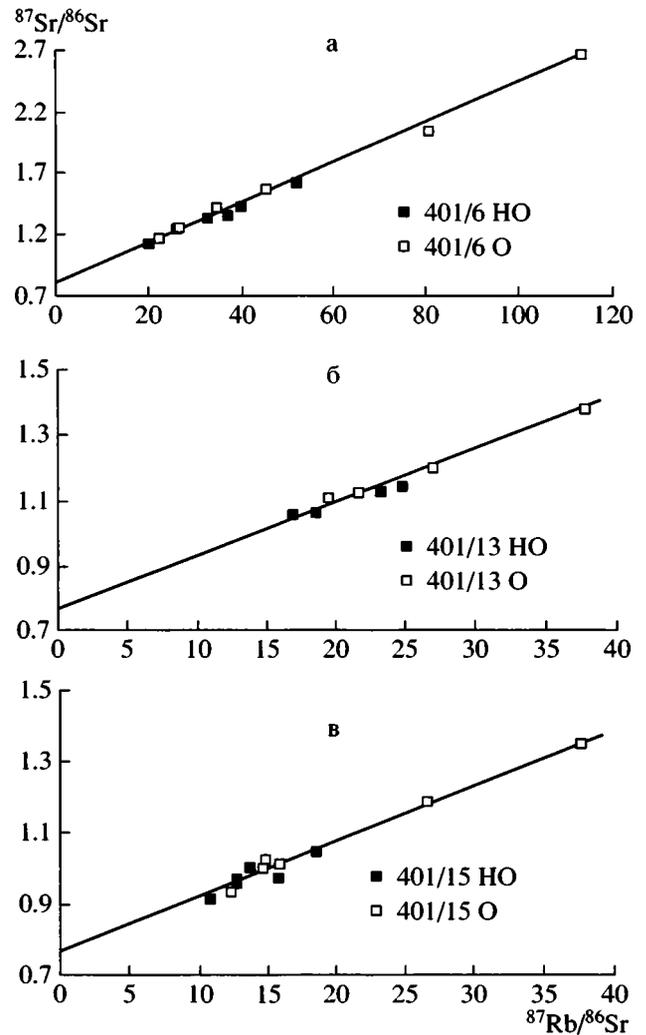


Рис. 2. Изохронные зависимости для необработанных (HO) и обработанных (O) размерных глинистых фракций трех образцов из отложений усть-ильинской свиты по данным И.М. Горохова и др. (1997).

личину как ± 0.05 (что в 100 раз превышает аналитическую ошибку измерения), то ошибки в вычислении внутренней (трехточечной) прямолинейной зависимости все равно оказываются малыми, и зависимость остается изохронной, хотя рассчитанный возраст при этом изменяется в среднем на $\pm 50 \pm 100$ млн. лет.

Естественно, что ближе всего к истинному возрасту события можно приблизиться, учитывая данные только по остаткам от выщелачивания. Они представляют собой пробы, освобожденные от вероятно чуждого самой минеральной системе легко подвижного стронция. Рассмотрим с позиций сказанного фактически материалы, приведенные в статье И.М. Горохова и др. (2001).

Изохронные построения

При построении внутренних изохрон самым уязвимым звеном оказывается использование данных по вытяжкам. Но без них внутренние изохроны вообще теряют смысл. Можно попытаться исправить положение и объединить в расчете данные по разным глинистым фракциям. В изохронных координатах они также нередко образуют линейные зависимости. Такое объединение выполнено на рис. 10 рассматриваемой работы, и приводятся обоснования, что линейные зависимости на графике представляют собой линии смешения. Слабость приводимых обоснований видимо ясна и самим авторам, которые сопровождают их такими словами: "Все сказанное позволяет заключить, что современные или геологически не-

Результаты изохронных расчетов (York, 1966) для глинистых фракций обработанных (О) и необработанных (НО) проб юсмастахской и усть-ильинской свит (Горохов и др., 1997; 2001)

Образец	Число измерений	Возраст, млн. лет	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$
Юсмастахская свита			
АН-33 О	12	1062 ± 70	0.845 ± 0.037
АН-33 НО	9	1036 ± 107	0.858 ± 0.057
АН-33 О + НО	21	1054 ± 56	0.850 ± 0.030
АН-42 О	12	1034 ± 30	0.800 ± 0.009
АН-42 НО	7	1038 ± 40	0.800 ± 0.013
АН-42 О + НО	19	1036 ± 23	0.800 ± 0.007
Усть-ильинская свита			
401/6 О	6	1103 ± 99	0.840 ± 0.048
401/6 НО	6	1010 ± 150	0.857 ± 0.064
401/6 О + НО	12	1077 ± 88	0.839 ± 0.040
401/13 О	4	1014 ± 155	0.819 ± 0.053
401/13 НО	4	775 ± 184	0.869 ± 0.053
401/13 О + НО	8	1004 ± 175	0.811 ± 0.055
401/15 О	6	1051 ± 556	0.768 ± 0.110
401/15 НО	6	1100 ± 226	0.768 ± 0.053
401/15 О + НО	12	1113 ± 203	0.759 ± 0.043

О – образцы, обработанные 1N раствором ацетата аммония.
НО – необработанные образцы.

давние поровые воды, вероятно, не служили *основным*¹ источником подвижного стронция...” (Горохов и др., 2001, с. 17).

На рис. 1 и 2 нашей статьи воспроизведены графики для всех размерных фракций нижне- и верхнеюсмастахских аргиллитов, а в таблице показаны изохронные расчеты для них. Довольно большой разброс точек относительно аппроксимирующих прямых и отсутствие основополагающих точек в начале координат (вытяжки) вызывают большие ошибки измеряемых параметров прямых. Характерно, что точки, которые отвечают необработанным пробам, ложатся на те же самые линии, что и по обработанным (рис. 1 а, б). Такое совпадение можно объяснить тем, что в вытяжку уходит относительно небольшое количество вещества, и его баланс в пробе при этом почти не нарушается.

Из таблицы и рис. 1в хорошо видно, что все размерные фракции обоих образцов, принадлежащих разным подсвитам, имеют одинаковый возраст и несколько различное первичное изо-

топное отношение, хотя специальный строгий статистический расчет показывает, что прямые между собой не различаются. Обнаруженное авторами (Горохов и др., 2001) различие в возрасте размерных глинистых субфракций этих образцов является артефактом, который обусловлен неравномерностью представлений о полном единстве изотопной Rb-Sr системы связанного в минералах и “подвижного” вещества. В то же время можно предположить, что их “неполное единство” все же реально существует. Это предположение обосновывается в следующем разделе.

О природе подвижного стронция

Как отмечается в рассматриваемой работе: “По мере уменьшения размера частиц в субфракциях ...1. Доли выщелачиваемых Rb и Sr и отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в ацетатной вытяжке возрастают.” (Горохов и др., 2001, с. 11). Может быть, такое возрастание связано с тем, что в вытяжку переходит и часть вещества самих глинистых минералов? Ведь тогда минеральное вещество будет преимущественно извлекаться из мелких фракций, и именно с этим обстоятельством могут быть связаны и поразительно высокие начальные изотопные отношения Sr в аргиллитах. Кроме того, нужно учесть, что опробованные глинистые породы залегают в виде редких тонких прослоев в сплошной толще карбонатных пород, мощность которой достигает 800 м. Изотопный состав Sr в этих карбонатах чрезвычайно низкий (Покровский, Виноградов, 1991). Резкий контраст изотопного состава Sr во вмещающих породах и в глинистых прослоях проще всего объяснить тем, что основная масса “подвижного” Sr извлекается из его “неподвижной” минеральной части. Логично предположить, что выщелачиваемый стронций представляет собой смесь его сорбированной на глинистых минералах части и извлеченной из минералов, причем в рассматриваемом случае вторая часть резко преобладает над первой. Возможность экстракции из глинистых фракций собственно минерального Sr с помощью 2.5 N HCl была показана ранее (Клауэр, 1984), что и вызвало необходимость использования более слабых растворителей. Но их полная безучастность по отношению к минеральному Sr только предполагается.

Соотношение форм извлекаемого Sr зависит от состава исследуемых фракций. В смектитах и Sr, и Rb будут находиться только в обменном положении; в смешанослойных 2 : 1 минералах типа смектит-слюда Rb почти целиком будет входить в структуру минерала, а Sr почти целиком будет обменным. В собственно 2 : 1 слюдах весь Rb находится в межслоевых позициях, а Sr – только частично. С уменьшением размера частиц при обработке образца даже ацетатом аммония неизбежно будут возрастать аналитически значимые количества обмена не только структурного Sr, но

¹ Выделено авторами (Горохов и др., 2001).

и структурного Rb на ион аммония (Браун, 1965, Годовиков, 1983).

Ранее И.М. Горохов и др. (1997) опубликовали результаты аналогичных исследований глинистых пород усть-ильинской свиты, которая лежит в основании карбонатной толщи билляхской серии котуйканского разреза. Используя тот же прием построения внутреннего изохрон (вытяжка – остаток – необработанная проба), авторы

доказывают, что породы испытали два этапа преобразования – около 1400 и 1190 млн. лет назад, и связывают эти выводы с представлениями о двух генерациях иллита. На рис. 2 нашей статьи показано положение точек для обработанных и необработанных проб всех размерных глинистых фракций по трем образцам аргиллитов усть-ильинской свиты, изученным И.М. Гороховым и др. (1997), а в таблице – результаты изохронных расчетов по ним. Разброс точек и соответственно ошибки в определении параметров прямых в пробах усть-ильинской свиты значительно выше, что может объясняться преимущественно терригенным, грубозернистым составом слагающих ее пород. Тем не менее, рассчитанный возраст по всем образцам оказывается сходным с полученным по пробам юсмастакской свиты.

Таким образом, по данным изучения размерных глинистых фракций аргиллитов (Горохов и др., 2001; Горохов и др., 1997), отобранных на трех стратиграфических уровнях котуйканского разреза – в кровле усть-ильинской свиты, в основании верхней и нижней подсвит юсмастакской свиты по совокупности размерных глинистых фракций на изохронных графиках, построенных без учета данных по вытяжкам, фиксируется один и тот же наклон линий. Такое положение этих линий не оставляет места для случайности. Альтернативное объяснение, как случайное совпадение наклонов линий смещения на трех разобщенных уровнях разреза в интервале 600 м по мощности и к тому же в различных фациальных зонах осадконакопления, представляется совершенно невероятным. Остается предположить, что наклон этих линий действительно отражает возраст некоего эпигенетического события, которое произошло около 1000–1100 млн. лет назад и затронуло всю толщу довендских отложений Анабарского массива. Не исключено, что это событие явилось отголоском широко проявленного на Земле гренвилльского орогенеза. Вопрос о продолжительности или этапности процессов преобразования, равно как и о возрасте осадконакопления, остается открытым.

О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ МЕТОДОЛОГИИ

Анализ рассматриваемой работы показывает, что ее авторы имели ясное представление о стра-

тиграфическом возрасте пород юсмастакской свиты еще до начала своих исследований, хотя и признавали, что “возрастные рамки юсмастакской свиты определяются комплексом изотопно-геохронологических, хемотратиграфических и палеонтологических данных, интерпретация которых в текущей литературе не всегда однозначна” (Горохов и др., 2001, с. 6). Очевидно, что такая неоднозначность может быть вызвана разными причинами и в первую очередь, видимо, самим существом используемых методов.

В качестве одного из таких современных методов авторы привлекают изотопно-геохимический углеродный анализ. В последние годы он широко используется в хемотратиграфических построениях. Однако применимость его для рифейских отложений пока что очень сомнительна, что определяется многими факторами. Прежде всего, само построение кривой, которая отражает закономерности изменения значений $\delta^{13}\text{C}$ во времени, опирается на некоторые разобщенные и неполные опорные разрезы, возрастное расчленение которых не всегда должным образом обосновано (Раабен, 2001). Вообще говоря, реальность рифейской временной шкалы очень проблематична. Кроме того, время каждого из трех подразделений рифея превышает половину фанерозойского. При построении фанерозойской части кривой (Veizer et al., 1999) даже при шаге в 20 млн. лет разброс значений $\delta^{13}\text{C}$ в пределах каждого шага обычно превышает тот, на котором строится изотопная хемотратиграфия рифея. Колебания значений $\delta^{13}\text{C}$ в карбонатах верхнего протерозоя (500–800 млн. лет) достигают 8‰ во временных интервалах продолжительностью в несколько десятков миллионов лет (Jacobsen, Kaufman, 1999; Walter et al., 2000). Поэтому сегодня опираться на изотопно-углеродные данные для корреляции удаленных друг от друга разрезов отложений среднего и раннего рифея вряд ли возможно, тем более что во всей довендской части котуйканского разреза размах колебаний изотопного состава карбонатного углерода укладывается в диапазон 1–2‰.

Большое внимание И.М. Горохов и его соавторы уделяют минералогическому исследованию глинистых фракций изучаемых образцов. Но некоторые принятые ими априорные посылки нуждаются в коррективах. Основные из них касаются следующих моментов. 1. Авторы полагают, что иллиты модификации 1М обязательно аутигенны. Это не так. Слюды 1М достаточно устойчивы и участвуют в седиментационном процессе наряду с другими филлосиликатами. 2. При анализе рифейских отложений вряд ли вообще можно говорить об аутигенных минералах зоны диагенеза. Во всяком случае, необходимы доказательства, что “структурное совершенство” выделенных субфракций не возникло в ходе обработки образцов (истирание, ультразвук, растворитель).

3. И.М. Горохов и др. пишут: “Различие же индексов кристалличности иллитов в крупнозернистых и мелкозернистых субфракциях может быть указанием на их образование на разных стадиях литогенеза” (2001, с. 10). Но это может и не быть так. Различие индексов кристалличности крупных и мелких фракций свидетельствует в первую очередь о большей истираемости минеральной фазы с большей полушириной пика 001. Определяющая роль истираемости различных минеральных фаз в накоплении их в самых тонких фракциях показана Г.В. Куликовой с соавторами (1966).

4. Обсуждение вклада полевых шпатов в изотопный возраст субфракций и принятие априори их обломочного происхождения (Горохов и др., 2001, с. 19) по меньшей мере некорректно. Рассуждения об аутигенности или аллотигенности полевого шпата в рифейских породах во фракциях <3 мкм просто не имеет смысла, так как ни то, ни другое не доказуемо.

Что касается биостратиграфического расчленения и корреляции рифейских отложений, то связанные с этим трудности хорошо известны (Семихатов, 1995, 1997 и др.) и в полной мере подкрепляются высказываниями самих авторов рассматриваемой статьи: “Мнение о позднерифейском возрасте нижнебилляхских органостенных микрофоссилий не может быть принято по двум причинам. Во-первых, ему противоречат изотопные датировки...” (Горохов и др., 2001, с. 6). Мы обрываем эту цитату на очень важном в методологическом отношении моменте. Очевидно, что если используемые методы не дают определенного ответа на поставленный вопрос, то любое их количество не изменит ситуацию и не сделает ее более ясной. Ориентироваться приходится лишь на один из методов, на тот, который на сегодняшний момент принимается как определяющий. Из приведенной цитаты и из всей направленности рассматриваемой статьи следует, что в качестве такого определяющего метода авторы принимают результаты изотопного датирования. Однако интерпретация полученных ими данных, как нам представляется, ошибочна, что связано, видимо, с их убеждением в правомочности заключений, основанных на данных других методов исследования.

В действительности противоречия между био-, хемотратиграфической и изотопной шкалами здесь нет, поскольку палеобиологи рассматривают хронологические соотношения осадочных толщ только через призму эволюции органического мира. Выделяемые ими в рамках наиболее представительных последовательностей микрообъектов биостратиграфические по своей сути подразделения остаются таковыми вне зависимости от любых приписанных им изотопных меток времени (см., например, Вейс и др., 2001).

Предлагаемая критическая заметка написана в рамках проекта РФФИ, грант № 01-05-64178.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Браун Г. (ред.) Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов. М.: Мир, 1965. 599 с.
- Вейс А.Ф., Петров П.Ю., Воробьева Н.Г. Геохронологический и биостратиграфический подходы к реконструкции истории докембрийской биоты: новые находки микрофоссилий в рифее западного склона Анабарского поднятия // Докл. РАН. 2001. Т. 378. № 4. С. 511–517.
- Виноградов В.И. Геологическое значение Rb-Sr и K-Ar изотопных датировок синих глин Прибалтики // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1997. Т. 5. № 5. С. 101–106.
- Годовиков А.А. Минералогия. М.: Недра, 1983. 647 с.
- Горохов И.М., Мельников Н.Н., Турченко Т.Л., Кутявин Э.П. Rb-Sr систематика пелитовых фракций в нижнерифейских аргиллитах: усть-ильинская свита, Анабарский массив, Северная Сибирь // Литология и полез. ископаемые. 1997. № 5. С. 530–539.
- Горохов И.М., Семихатов М.А., Мельников Э.П. и др. Rb-Sr геохронология среднерифейских аргиллитов юмастахской свиты, Анабарский массив, Северная Сибирь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2001. Т. 9. № 3. С. 3–24.
- Клауэр Н. Новый подход к Rb-Sr датированию осадочных пород // Изотопная геология. М.: Недра, 1984. С. 40–62.
- Куликова Г.В., Розина Е.Л., Семенова Н.Г. Об использовании ультразвука при изучении цементированных глинистых пород // Физические методы исследования минералов осадочных пород. М.: Наука, 1966. С. 314–323.
- Покровский Б.Г., Виноградов В.И. Изотопный состав стронция, кислорода и углерода в верхнедокембрийских карбонатах западного склона Анабарского поднятия (р. Котуйкан) // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320. № 5. С. 1245–1250.
- Раабен М.Е. Хемотратиграфическая C-изотопная корреляция верхнего рифея Арктики и Урала // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2001. Т. 9. № 2. С. 3–14.
- Семихатов М.А. Методическая основа стратиграфии рифея // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1995. Т. 3. № 6. С. 33–50.
- Семихатов М.А. Методы расчленения и корреляция рифея: современная оценка // Рифей Северной Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. С. 5–13.
- Clauer N., Savin S.M., Chaudhuri S. Isotopic compositions of clay minerals as indicators of the timing and conditions of sedimentation and burial diagenesis // Isotopic signatures and sedimentary records. Lecture notes in Earth Sciences. Berlin: Springer Verlag, 1992. V. 43. P. 239–286.
- Clauer N., O'Neil J.R., Bonnot-Courtois C., Holtzaffel T. Morphological, chemical, and isotopic evidence for smectite

in marine sediments // *Clays and Clay Minerals*. 1990. V. 38. № 1. P. 33–36.

Cordani U., Kawashita K., Filho A. Applicability of the Rubidium-Strontium method to shales and related rocks // *Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 1978. P. 93–117.

Jacobsen S.B., Kaufman A.J. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater // *Chemical geology*. 1999. V. 161. P. 37–57.

Ohr M., Halliday A.N., Peacor D.R. Sr and Nd isotopic evidence for punctuated clay diagenesis, Texas Gulf Coast // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. 105. № 1. P. 110–126.

Veizer J., Ala D., Azmy K. et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater // *Chemical Geology*. 1999. V. 161. P. 9–88.

Walter M.R., Veevers J.J., Calver C.R. et al. Dating the 840–544 Ma Neoproterozoic interval by isotopes of strontium, carbon, and sulfur in seawater, and some interpretative models // *Precambrian Research*. 2000. V. 100. P. 371–433.

York D. Least-squares fitting of a straight line // *Canad. J. Phys.* 1966. V. 44. P. 1079–1086.

Рецензенты Е.В. Бибикова, И.М. Горохов