

УДК 550.93:551.7:552.54

## РАННЕРИФЕЙСКАЯ БИЛЛЯХСКАЯ СЕРИЯ АНАБАРСКОГО ПОДНЯТИЯ, СЕВЕРНАЯ СИБИРЬ: ИЗОТОПНАЯ С–О ГЕОХИМИЯ И Рb–Рb ВОЗРАСТ ДОЛОМИТОВ

© 2019 г. И. М. Горохов<sup>1</sup>, \*, А. Б. Кузнецов<sup>1</sup>, М. А. Семихатов<sup>2</sup>,  
И. М. Васильева<sup>1</sup>, Н. Г. Ризванова<sup>1</sup>, Г. В. Липенков<sup>3</sup>, Е. О. Дубинина<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Геологический институт РАН, Москва

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт  
имени А.П. Карпинского, Санкт-Петербург

<sup>4</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва  
e-mail: gorokhov@ig1405.spb.edu

Поступила в редакцию 03.02.2019 г.

Принята к публикации 28.03.2019 г.

Определены концентрации U и Рb и изотопные составы углерода, кислорода и свинца в доломитах билляхской серии (в 6 образцах котуйканской свиты и 15 образцах юсмастакской свиты), слагающей верхнюю часть рифейского разреза Анабарского поднятия Северной Сибири. Величины  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в доломитах билляхской серии варьируют от  $-3.0$  до  $+0.8\text{‰}$  PDB и от 23.7 до 27.3‰ SMOW соответственно и согласуются с таковыми в карбонатных осадках, отлагавшихся 1600–1400 млн лет назад. На графике в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  18 фигуративных точек всех образцов котуйканской и юсмастакской свит располагаются вдоль прямой линии, которая отвечает возрасту  $1513 \pm 35$  млн лет. Полученный Рb–Рb возраст доломитов впервые дает прямую изотопно-геохронологическую характеристику осадочных пород чехла Анабарского поднятия и в сочетании с опубликованным ранее Rb–Sr возрастом глауконита нижележащей усть-ильинской свиты позволяет поместить всю осадочную последовательность билляхской серии в ранний рифей. Эти результаты указывают на относительно быстрое (в пределах ~10 млн лет) накопление терригенно-карбонатных отложений билляхской серии до внедрения долеритов котуйского комплекса и заложения мезопротерозойской куонамской магматической провинции на Сибирском кратоне. Новые данные ставят точку в дискуссиях о возрастном положении рифейских отложений, вскрытых на Анабарском поднятии.

**Ключевые слова:** рифей, Сибирская платформа, доломиты, U–Рb геохронология.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-592X27519-35>

### ВВЕДЕНИЕ

Расчленение огромного по продолжительности докембрия осложнено отсутствием быстро эволюционировавших групп организмов, подобных тем, на которые опирается стратиграфическая шкала фанерозоя. В разные годы для расчленения докембрия использовали различные подходы: структурно-вещественный, хронометрический и хроностратиграфический (Семихатов, 1995). Однако лишь последний доказал свою высокую перспективность, поскольку опирается на традиционное литостратиграфическое расчленение осадочных последовательностей с выделением опорных разрезов, анализом в них органических остатков и обязательным

использованием изотопной хемотратиграфии и геохронологии. Главная особенность хроностратиграфического подхода заключается в том, что в основу выделения подразделений положены вещественные комплексы пород, которые получают непосредственную палеонтологическую и изотопно-геохронологическую характеристику. Это позволяет ограничивать подразделения определенными интервалами геологического времени, проследивать их на площади и устанавливать эквиваленты в географически удаленных регионах.

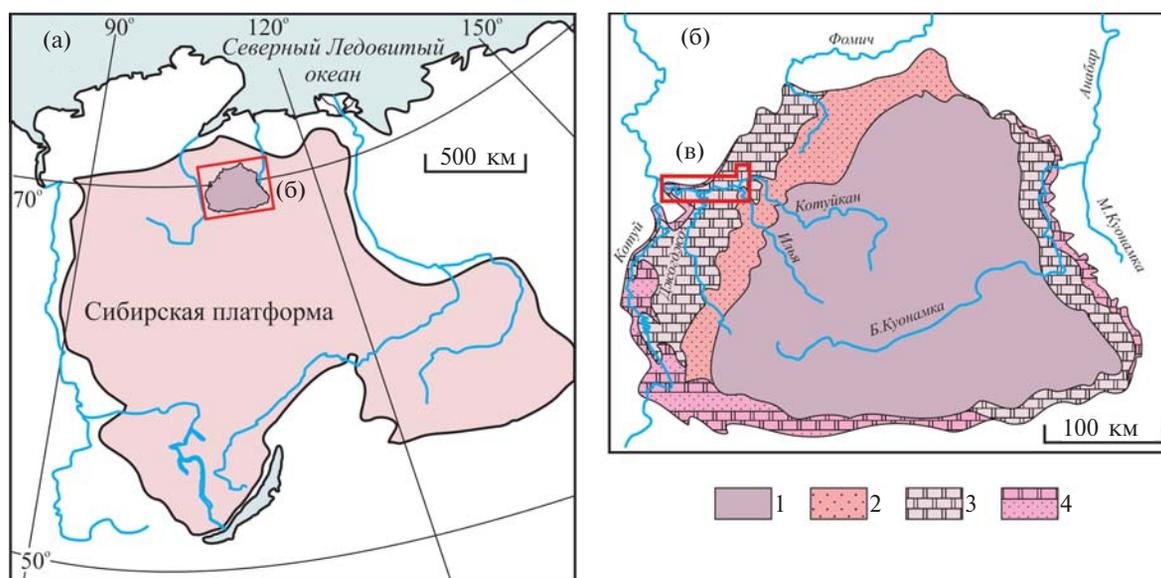
Изотопно-геохронологическая информация о возрасте стратиграфического подразделения может быть получена на основе прорывающих

магматических пород и обломочных цирконов из переслаивающихся терригенных отложений. Однако этот способ дает лишь верхнее и нижнее ограничение возраста, иногда в очень широких пределах. Поэтому особое значение в хроностратиграфии докембрия приобретают изотопные возрасты, полученные при изучении осадочных минералов (карбонатов, фосфатов, глобулярных и тонкозернистых слоистых силикатов), которые при определенных условиях дают прямую информацию о времени формирования осадочного подразделения.

Докембрийские отложения Сибири на Анабарском, Оленекском, Туруханском и Байкало-Патомском поднятиях и в Учуро-Майском регионе стали основой для разработки стратиграфических схем протерозоя Северной Евразии (Стратиграфия..., 1959; Злобин, 1968; Хоментовский и др., 1972; Шпунт и др., 1982; Семихатов, Серебряков, 1983). В современной мегаструктуре северной части Сибирской платформы особое место занимает Анабаро-Оленекская антеклиз, в центре которой расположен крупный выход пород кристаллического фундамента – Анабарское поднятие (рис. 1). По периферии Анабарского поднятия метаморфизованные архейские и нижнепротерозойские породы с угловым несогласием перекрыты верхнепротерозойско-палеозойским осадочным чехлом (рис. 2), базальные горизонты которого сложены рифейскими породами мукунской и билляхской серий. Отложения мукунской серии представлены песчаниками аллювиального,

эолового и озерного генезиса (Петров, 2014). Билляхская серия, сложенная доломитами, трансгрессивно перекрывается терригенно-карбонатной старореченской свитой венда (Злобин, 1968). Начиная с позднего протерозоя, отложения чехла Анабарского поднятия не вовлекались в зоны складчатости и не были деформированы тектоническими процессами. Из-за положения северного края Сибирской платформы в высоких широтах процессы химического выветривания здесь почти не проявлены. Таким образом, совокупность геологических и географических факторов способствовала сохранению этого объекта для исследований.

Интенсивное биостратиграфическое изучение рифейских отложений Анабарского поднятия в течение второй половины двадцатого столетия (Комар, 1966; Злобин, 1968; Голованов, 1970; Крылов, 1975; Шпунт и др., 1982; Головенко, Белова, 1984; Якшин, 1991; Вейс, Воробьева, 1992; Вейс и др., 2001; Сергеев и др., 2007) привело к разработке ряда индексов для строматолитов и органостенных и окремненных микрофоссилий, что сделало анабарский разрез одним из опорных для верхнего докембрия и позволило предположить существование в составе билляхской серии трех эратем рифея – нижнего, среднего и верхнего. В рифейских отложениях поднятия была выделена ассоциация органостенных микрофоссилий и реликты эвкариот, которые представляют особый “анабарский” тип микробиот, позднее переименованный в “котуйканский” (Sergeev, 2009; Vorob'eva et al., 2015). Это биостратиграфи-



**Рис. 1.** Положение Анабарского массива в пределах Сибирской платформы (а), схема его геологического строения (б) и положение района работ в бассейне р. Котуйкан (в).

1 – архей-нижнепротерозойский фундамент, 2 – рифейские терригенные отложения (мукунская серия), 3 – рифейские карбонатные отложения (билляхская серия), 4 – вендские отложения (старореченская свита). В скобках приведены названия стратиграфических подразделений на западном склоне Анабарского поднятия.

ческое изучение значительно опередило изотопно-геохронологические исследования, в которых в то время использовались главным образом Rb–Sr и K–Ar геохронометры – глобулярные и тонкозернистые слоистые силикаты глауконового и иллитонового состава (Гаррис и др., 1964; Горохов и др., 1991, 1997а, 2001; Gorokhov et al., 1991; Зайцева и др., 2016). Определение U–Pb возраста бадделеитов из даек и силлов в осадочных породах чехла Анабарского поднятия, связанное с палеомагнитными исследованиями, было предпринято лишь в начале нынешнего века (Ernst et al., 2000; Эрнст и др., 2016). Однако положение многих из этих магматических пород в рифейском разрезе до сих пор еще недостаточно хорошо установлено, что не позволяло прийти к сколько-нибудь определенным стратиграфическим выводам. Поэтому изотопно-геохронологические исследования собственно осадочных образований Анабарского поднятия являются весьма актуальными. В предлагаемой работе представлены результаты U–Pb датирования доломитов билляхской серии, которые способствуют новому пониманию истории позднпротерозойского осадконакопления в этом регионе.

#### U–Pb ДАТИРОВАНИЕ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

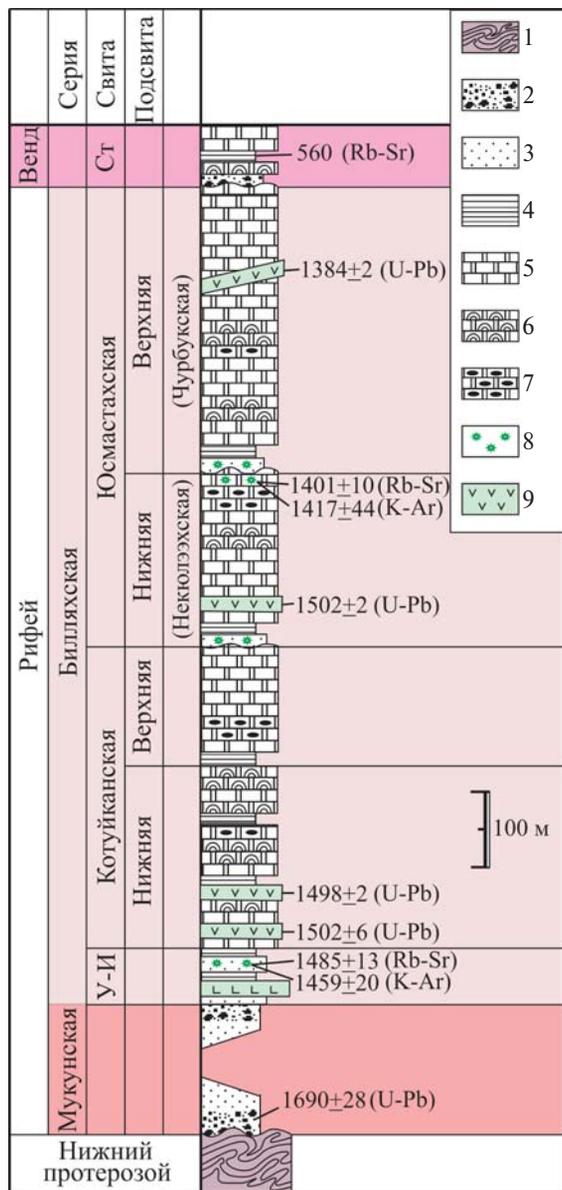
Современный уровень U–Pb и Pb–Pb методов датирования открывает возможность корректного определения возраста карбонатных осадочных пород (Moorbath et al., 1987; Jahn, Cuvellier, 1994; Babinski et al., 1995; Russell et al., 1996; Овчинникова и др., 1998, 2000, 2007, 2012; Bolhar et al., 2002; Семихатов и др., 2003; Кузнецов и др., 2005, 2008; Kuznetsov et al., 2013; Каурова и др., 2010; Romero et al., 2013). Начальные содержания U и Pb в осадочных карбонатах очень малы (Каурова и др., 2010) и зависят от концентраций этих элементов в морской воде и коэффициентов распределения между карбонатными минералами и водной фазой. Однако накопление и превращение осадка в породу сопровождается изменениями его химического и минерального состава. Уже в процессе раннего диагенеза (в том числе раннего образования доломита за счет высокомагнезиального кальцита) отдельные компоненты осадка взаимодействуют друг с другом, со средой (морской водой) и остаточными поровыми водами, стремясь к установлению в системе физико-химического равновесия. Происходит перераспределение U и Pb между карбонатными минералами и поровыми водами, и в результате первичный карбонатный материал обычно обедняется ураном и обогащается свинцом (Jahn, Cuvellier, 1994; Овчинникова и др., 1998). Поэтому значения U–Pb и Pb–Pb

возраста карбонатных осадочных пород в большинстве случаев следует интерпретировать как время раннего диагенеза карбонатных осадков, которое для протерозойских известняков и доломитов в пределах погрешности определения обычно близко ко времени осадконакопления. Аналитическая надежность значений возраста при этом находится в прямой зависимости от диапазона вариаций отношения  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  в изученных образцах.

После того как метастабильная первичная карбонатная ассоциация превращается в стабильный низкомагнезиальный кальцит (или доломит) и остаточное поровое пространство становится замкнутым, порода ведет себя преимущественно как закрытая геохимическая система. Тем не менее вторичные преобразования на стадии эпигенеза могут приводить к повторному перераспределению U и Pb между карбонатными фазами и эпигенетическими флюидами, создавая препятствия на пути изотопного датирования карбонатных осадочных пород, а часто делая его невозможным. Поэтому получение надежных Pb–Pb датировок требует анализа наименее измененных образцов, что при работе с докембрийским материалом выражается в стремлении не ограничиваться использованием обычных петрографических сведений о сохранности первичных текстурно-структурных особенностей карбонатов, а привлекать для оценки их геохимической сохранности элементные и изотопные отношения в датированных образцах (Каурова и др., 2010).

Работы, выполненные в течение последних трех десятилетий (Smith et al., 1994; Russell et al., 1996; Овчинникова и др., 1998, 2012; Семихатов и др., 2000, 2003; Кузнецов и др., 2003, 2008; Kuznetsov et al., 2013; Sarangi et al., 2004; Babinski et al., 2007; Romero et al., 2013), продемонстрировали, что известняки являются наилучшим материалом для прямого Pb–Pb изотопного датирования карбонатных осадков. Однако опыт работы с докембрийскими доломитами на многих континентах показал, что эти породы также в ряде случаев пригодны для оценки возраста формирования карбонатных осадков (Moorbath et al., 1987; Jahn et al., 1990; Babinski et al., 1995; Овчинникова и др., 2000, 2007; Bolhar et al., 2002; Каурова и др., 2010), хотя геохимические критерии получения изотопно-геохронологических характеристик их исходного осадочного материала до сих пор не найдены.

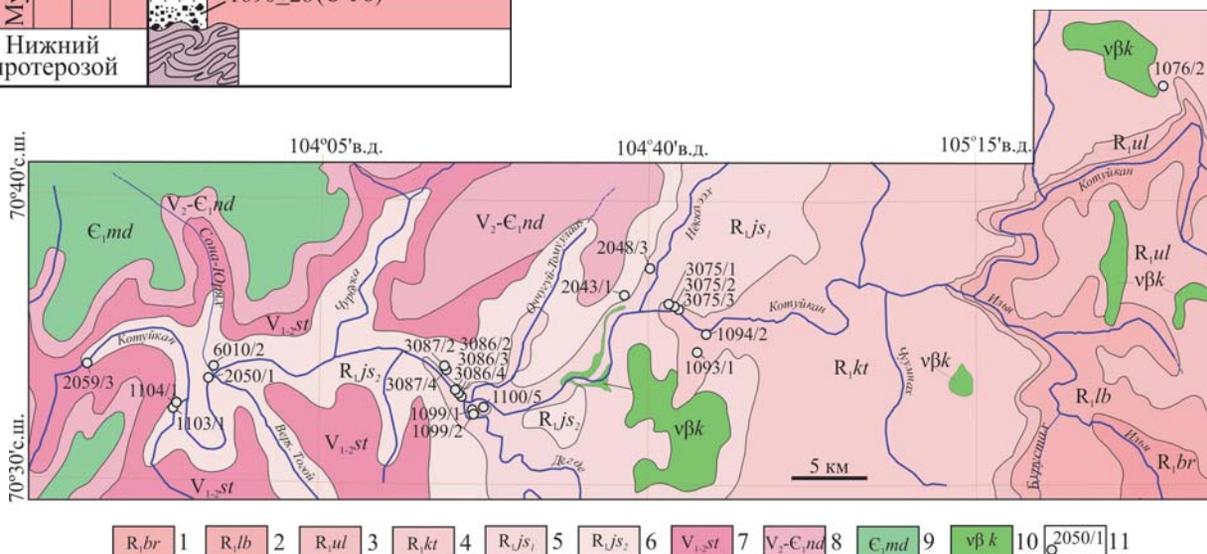
Протерозойские карбонатные отложения чехла Анабарского поднятия, в том числе билляхской серии, представлены исключительно доломитами. Они являются удобным объектом для продолжения поиска методического подхода к изотопно-геохронологическому исследованию этих



**Рис. 2.** Строение разреза докембрийских отложений западного склона Анабарского массива. 1 – метаморфические породы фундамента, 2 – граvelteлиты, 3 – песчаники, 4 – аргиллиты, 5 – доломиты, 6 – строматолитовые карбонаты, 7 – доломиты с кремнями, 8 – линзы с глауконитом, 9 – дайки диабазов. Указанные на рисунке датировки (млн лет):  $1401 \pm 10$  и  $1417 \pm 44$  – Rb–Sr и K–Ar возрасты глауконита юсмастакской свиты (Зайцева и др., 2016);  $1384 \pm 2$  – U–Pb возраст бадделеита Чиэресской дайки (Ernst et al., 2000);  $1485 \pm 13$  и  $1459 \pm 20$  – Rb–Sr и K–Ar возрасты глауконита усть-ильинской свиты (Горохов и др., 1991; Зайцева и др., 2016);  $1690 \pm 28$  – U–Pb возраст обломочного циркона песчаников мукунской серии (Khudoley et al., 2015);  $1502 \pm 6$ ,  $1498 \pm 2$  и  $1502 \pm 2$  – U–Pb возраст бадделеитов из долеритовых силлов, рвущих доломиты бильяхской серии (Эрнст и др., 2016); 560 – Rb–Sr возраст тонкозернистой субфракции иллита из аргиллитов старореченской свиты (Горохов и др., 2010). Сокращения: У-И – усть-ильинская, Ст – старореченская.

пород. Основу настоящей работы составила новая представительная коллекция, собранная сотрудниками ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) в ходе полевых исследований при подготовке к изданию комплекта Государственной геологической карты листа R-48 (Хатанга) масштаба 1 : 1000 000 (третьего поколения) (Государственная..., 2016).

Целью работы было получение новых изотопно-геохимических и геохронологических данных для рифейских карбонатных пород бильяхской серии с последующим контролем и уточнением стратиграфической схемы для осадочной последовательности Анабарского поднятия. В задачи работы входило получение С–О изотопных и U–Pb (Pb–Pb) характеристик доломитов, как источников информации о среде, условиях



**Рис. 3.** Места отбора изученных образцов доломитов бильяхской серии в долине р. Котуйкан. 1–9 – свиты: 1 – бурдурская, 2 – лабзатакская, 3 – усть-ильинская, 4 – котуйканская, 5, 6 – юсмастакская (5 – нижняя подсвита, 6 – верхняя подсвита), 7 – старореченская, 8 – немакит-далдынская, 9 – медвежинская; 10 – котуйский комплекс габбро-долеритов; 11 – номера образцов.

и времени их образования, и рассмотрение возможности применения этих характеристик в геохронологических построениях, а также сравнение полученных изотопных характеристик и возрастов карбонатных отложений чехла Анабарского поднятия с соответствующими характеристиками пород в типовых разрезах верхнего протерозоя.

### ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Наиболее представительная последовательность рифейских отложений западного склона Анабаро-Оленекской антеклизы вскрыта вдоль бассейна р. Котуйкан и на ограниченном участке бассейна среднего течения р. Котуй (рис. 3), где эти отложения залегают с резким угловым несогласием и местами с корой выветривания на породах фундамента (рис. 2). Базальные горизонты указанной последовательности расчленяются на две контрастные по составу и условиям формирования серии – нижнюю терригенную мукунскую (650–750 м) и вышележащую преимущественно карбонатную билляхскую (900–1100 м) (Комар, 1966; Злобин, 1968; Голованов, 1970; Шпунт и др., 1982). Накопление континентальных отложений мукунской серии происходило в условиях аллювиальной, эолово-аллювиальной и озерно-аллювиальной фаций (Петров, 2014), вследствие чего эти отложения не содержат органических остатков. Напротив, билляхская серия, которая отлагалась в пределах разнообразных морских фаций (от открытоморских шельфовых до литоральных), содержит таксономически богатый набор строматолитов, органостенных и кремневых микрофоссилий (Комар, 1966; Голованов, 1970; Шпунт и др., 1982; Головенко, Белова, 1984; Якшин, 1991; Вейс, Воробьева, 1992; Вейс и др., 2001; Сергеев и др., 2007; Vorob'eva et al., 2015). На западном склоне Анабарского поднятия различные горизонты билляхской серии трансгрессивно, а местами и с небольшим несогласием перекрываются породами старореченской свиты (80–180 м) верхнего венда, на которые, в свою очередь, со следами размыва налегают верхневендско-нижнекембрийские немакит-далдынская и манькайская свиты.

Билляхская серия объединяет три свиты (снизу вверх) – усть-ильинскую (55–65 м), котуйканскую (250–320 м) и юсмастахскую (650–830 м). Две последние расчленяются на подчиненные подразделения, иногда понимаемые как самостоятельные свиты (Злобин, 1968; Семихатов, Серебряков, 1983; Государственная..., 2016).

*Усть-ильинская свита* в нижней части представлена песчаниками и алевролитами с подчиненными прослоями гравелитов и аргиллитов, а в верхней – ритмично чередующимися темно-серыми до черных аргиллитами и полевош-

пат-кварцевыми алевролитами с редкими прослоями известково-доломитовых алевролитов и доломитов. Количество последних растет вверх по разрезу. В аргиллитах отчетливо выражена горизонтальная слоистость, подчеркнутая распределением слюды, глинистого материала, тонко распыленного органического вещества и рудных минералов. В различных частях разреза свиты встречается глауконит.

*Котуйканская свита* связана постепенными переходами с отложениями усть-ильинской свиты и представляет собой сложную по составу и разнообразную по окраске толщу пород с многочисленными пластами строматолитов, с онколитами и катаграфиями, подразделяющаяся на две подсвиты. Нижняя подсвита сложена чередующимися пестроцветными строматолитовыми доломитами и хемогенно-глинистыми и глинисто-алевритуистыми доломитами с прослоями темно-серых доломитовых мергелей, доломитовых брекчий, алевроито-глинистых пород и алевролитов. Верхняя подсвита котуйканской свиты включает меньше терригенного материала и представлена светло-серыми грубо-плитчатыми и массивными строматолитовыми доломитами, которые на нижних уровнях заключают прослой темно-серых аргиллитов, а у кровли содержат пласты тонкослоистых доломитовых мергелей.

*Юсмастахская свита* залегают со следами размыва на верхнекотуйканских отложениях и расчленяется на две подсвиты. Эти подсвиты различаются по составу пород, характеру их переслаивания, набору строматолитов и микрофоссилий и, по-видимому, разделены поверхностью размыва (Злобин, 1968; Шпунт и др., 1982). Такие различия в строении и наличие седиментологического несогласия привели к выводу о возможности перевода подсвит юсмастахской свиты в разряд самостоятельных свит – некулээхской и чурбукской (Злобин, 1968; Государственная..., 2016). Однако по стратиграфическому объему эти свиты отвечают соответственно нижней и верхней подсвита юсмастахской свиты, и поэтому в настоящей работе мы сохраняем за верхним подразделением рифейского разреза Анабарского поднятия традиционное название “юсмастахская свита”.

Разрез нижней подсвиты юсмастахской свиты начинается с небольшой пачки кварцевых и полевошпат-кварцевых бурых песчаников, которые в верхней части чередуются с редкими прослоями глинистых доломитов и мергелей. Завершает разрез нижней подсвиты толща плитчатых и массивных темноокрашенных, главным образом строматолитовых доломитов, содержащих тонкие прослой оолитовых доломитов, линзы плоскогалечных конгломерато-брек-

чий и зеленовато-серых глинистых доломитов. Вблизи кровли подслиты залегают прослои алевитисто-песчанистых доломитов.

Верхняя подслита юсмастахской свиты разделяется на две толщи, нижняя из которых представлена голубовато- и коричневатого-серыми окремненными доломитами с прослоями строматолитовых разностей и более редких мергелей. В верхней толще преобладают темно-серые и розовато-серые строматолитовые доломиты и подчиненные тонкие прослои доломитовых мергелей, а иногда и алевролитов.

Органостенные микрофоссилии, обнаруженные в отложениях билляхской серии, отражают этап эволюционного развития микробиот в раннем рифее, который предшествовал взрывообразной диверсификации эвкариот в позднем рифее (Sergeev, 2009; Vorob'eva et al., 2015). Среди микрофоссилий доминируют акинеты *Archaeoellipsoides* и *Mухосcoides grandis*, а также энтофизалесовые цианобактерии. В нижней части серии присутствуют трихомы *Filiconstrictosus*, *Partiofilum* и *Orculiphycus*.

На основании биостратиграфических исследований второй половины XX столетия вся осадочная последовательность, объединяемая под названием “билляхская серия”, считается рифейской (Савицкий, Соболевская, 1955; Стратиграфия..., 1959). Однако если относительно раннерифейского возраста усть-ильинской и котуйканской свит у исследователей существует полное согласие, то дискуссии о принадлежности различных горизонтов юсмастахской свиты к нижнему, среднему или даже верхнему рифею (Злобин, 1968; Шпунт и др., 1982; Семихатов, Серебряков, 1983; Покровский, Виноградов, 1991; Вейс, Воробьева, 1992; Вейс и др., 2001; Knoll et al., 1995; Sergeev et al., 1995; Горохов и др., 2001; Khudoley et al., 2015; Зайцева и др., 2016; Государственная..., 2016; Эрнст и др., 2016) продолжают уже более полувека и не утихают до сих пор. Такое разнообразие представлений о возрасте отложения юсмастахских осадков подчеркивает актуальность и необходимость изотопно-геохронологических исследований в этом направлении.

Согласно данным U–Pb, Sm–Nd и K–Ar изучения дорифейских пород Анабарского поднятия (Тарасов и др., 1963; Бибикина и др., 1987; Гусев и др., 2012), метаморфические процессы (метаморфизм гранулитовой фации, ретроградный метаморфизм и связанные с ними бластомилонитизация и мигматизация) происходили в этих породах 2.75–1.97 млрд лет назад. Цирконы в геологически наиболее молодых дорифейских гранитоидах имеют U–Pb возрасты  $1843 \pm 12$  и  $1760 \pm 20$  млн лет (Розен и др., 2000). Таким образом, процессы магматизма, метаморфизма

и возникновение главных структурных элементов в высокометаморфизованных архейско-нижнепротерозойских образованиях Анабарского поднятия завершились 2000–1760 млн лет назад (Бибикина и др., 1987; Смелов и др., 2012; Глуховский и др., 2015).

Максимальный возрастной предел отложений чехла Анабарского поднятия определяется U–Pb возрастом обломочных цирконов из базальных горизонтов мукунских песчаников ( $1681 \pm 28$  млн лет; Khudoley et al., 2015). U–Pb возраст бадделеитов из долеритовых силлов в породах билляхской серии оценивается как  $1502 \pm 6$ ,  $1502 \pm 2$  и  $1498 \pm 2$  млн лет (Эрнст и др., 2016), но положение некоторых силлов в разрезе серии еще требует уточнения. Для глауконитов усть-ильинской свиты, подстилающей котуйканские отложения, Rb–Sr и K–Ar методами получены возрасты соответственно  $1483 \pm 10$  и  $1459 \pm 20$  млн лет (Горохов и др., 1991; Gorokhov et al., 1991), а Rb–Sr и K–Ar датировки Al-глауконита из нижней подслиты юсмастахской свиты равны соответственно  $1401 \pm 10$  и  $1417 \pm 44$  млн лет (Зайцева и др., 2016). U–Pb возраст бадделеита из диабазовой дайки, прорывающей отложения нижней подслиты юсмастахской свиты на восточном склоне Анабарского поднятия, равен  $1384 \pm 2$  млн лет (Ernst et al., 2000). Таким образом, возраст билляхской серии, вероятно, заключен в промежутке 1500–1400 млн лет. Вендский возраст диагенеза погружения отложений старореченской свиты, которая несогласно залегают на породах билляхской серии, установлен Rb–Sr методом (~560 млн лет) по тонкозернистой субфракции иллита, выделенной из аржиллитов верхней части этой свиты (Горохов и др., 2010).

## МЕТОДИКА

Образцы доломитов билляхской серии были отобраны на правом и левом берегу р. Котуйкан на протяжении 80 км вблизи притоков рек Чуостах, Неключюээх, Дегде (Джогджо), В. Тогой, Н. Тогой и Кокор (рис. 3).

Содержания Ca и Mg в карбонатной составляющей доломитов после растворения при нагревании навески 0.1 г в 10%-ной HCl определяли в лаборатории МЕХАНОБР-АНАЛИТ (Санкт-Петербург) методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-OES) на спектрометре ICP-7200 (Thermo Fisher Scientific). Содержания Mn и Fe после растворения навески 2 г в 10%-ной HCl определяли в Центральной аналитической лаборатории ВСЕГЕИ тем же методом с использованием спектрометра Optima 4300 (Perkin Elmer). В этом же растворе определяли содержание Sr

методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре Agilent 7700.

Изотопный анализ С и О в доломитах выполнен методом GF IRMS на масс-спектрометре Delta V+ с использованием приставки GasBenchII. Разложение образцов карбонатных пород проведено в ортофосфорной кислоте при 70°C. Погрешности определения величин  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  составляли  $\pm 0.05$  и  $\pm 0.1\text{‰}$  ( $1\sigma$ ) соответственно. Величины  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  выражены относительно международных стандартов V-PDB и V-SMOW.

При изучении U–Pb систематики использовали валовые карбонатные составляющие пород (BCC – bulk carbonate constituent). Измельченные образцы обрабатывали 0.5 N HBr при комнатной температуре до полного растворения карбонатного материала. Раствор делили на две аликвоты, одна из которых предназначалась для измерения изотопного состава Pb, а другая – для определения содержаний U и Pb с использованием смешанного индикатора  $^{235}\text{U}$ – $^{208}\text{Pb}$ . Для выделения U использовали экстракционную смолу UTEVA SPEC, а для выделения Pb – ионообменную смолу Bio-Rad 1×8 (100–200 меш) в 0.5 N HBr (Manhes et al., 1978; Овчинникова и др., 1998, 2012).

Изотопный состав U и Pb определяли на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI. Измеренные изотопные отношения Pb были исправлены на коэффициент фракционирования, установленный путем многократного измерения изотопного состава Pb в стандарте NIST SRM 982 и равный 0.13% на единицу массы. Уровень лабораторных загрязнений, определявшийся холостыми опытами, не превышал для U 0.01 нг, а для Pb 0.1 нг. Обработку первичных изотопных данных проводили с использованием программ, составленной Н.Н. Мельниковым (Мельников, 2010), а вычисление параметров изохрон – с использованием программы ISOPLOT (Ludwig, 2003). Погрешности вычисленных значений возраста даны на уровне  $\pm 2\sigma$ .

РЕЗУЛЬТАТЫ

**Геохимия и изотопный состав углерода и кислорода в доломитах.** Результаты химического и С–О изотопного анализа карбонатных пород представлены в табл. 1.

*Котуйканская свита.* Изученные 6 образцов доломитов содержат 1–3% некарбонатной примеси. Отношения Mg/Ca в них варьируют от 0.53 до 0.58, указывая на присутствие в доломитах некоторого количества кальцитовой составляющей.

**Таблица 1.** Химический и изотопный состав доломитов билляхской серии

Номер образца	Н.О. %	Ca %	Mg %	Mn мкг/г	Fe мкг/г	Sr мкг/г	Mg/Ca	Mn/Sr	Fe/Sr	$\delta^{13}\text{C}$ V-PDB ‰	$\delta^{18}\text{O}$ V-SMOW ‰
Юсмастакская свита (верхняя подсвита)											
1100/5	1	22.1	12.8	41	770	32	0.58	1.3	24	–0.8	27.3
1103/1	1	22.0	12.7	93	1540	13	0.58	7.2	119	–0.6	24.4
1104/1	3	21.9	12.6	108	1610	17	0.58	6.4	95	–0.5*	24.8*
2043/1	4	22.1	12.8	36	520	15	0.58	2.4	35	0.8 0.7*	25.6 24.9*
2050/1	2	22.1	13.2	93	1120	19	0.60	4.9	59	0.5	26.1
2059/3	15	19.0	11.2	62	1610	20	0.59	3.1	81	–0.4	26.4
3087/2	1	21.9	13.6	65	1050	22	0.62	3.0	48	0.0 –0.1*	26.0 25.3*
3087/4	1	22.1	13.6	72	769	18	0.62	4.0	43	0.3*	24.7*
6010/2	1	–	–	62	770	28	–	2.2	28	–0.1	26.1
Юсмастакская свита (нижняя подсвита)											
1099/1	5	21.5	12.5	44	518	17	0.58	2.6	30	0.4*	25.5*
1099/2	6	21.2	12.4	49	660	15	0.58	3.3	44	0.3 0.3*	25.0 24.1*
2048/3	3	21.5	13.0	59	692	16	0.60	3.7	43	–0.1*	25.2*
3086/2	5	21.5	13.4	66	840	11	0.62	6.1	76	0.2	23.7
3086/3	2	21.6	13.4	70	574	14	0.62	5.0	41	0.2*	24.1*
3086/4	4	21.7	13.3	1080	10700	28	0.61	38.6	382	–0.7	26.6

Таблица 1. Окончание

Номер образца	Н.О. %	Са %	Mg %	Mn мкг/г	Fe мкг/г	Sr мкг/г	Mg/Ca	Mn/Sr	Fe/Sr	$\delta^{13}\text{C}$ V-PDB ‰	$\delta^{18}\text{O}$ V-SMOW ‰
Котуйканская свита											
1076/2	3	22.7	12.1	67	1260	24	0.53	2.8	53	-2.7 -3.0*	25.3 25.1*
1093/1	2	21.8	12.6	93	979	17	0.58	5.5	58	-0.4*	25.9*
1094/2	1	—	—	193	1820	16	—	12.1	114	-1.4	25.5
3075/1	2	22.0	12.6	178	1960	14	0.57	12.7	140	-0.5	25.6
3075/2	3	22.0	12.6	116	1260	18	0.57	6.4	70	-0.5 -0.6*	26.2 26.0*
3075/5	2	21.5	12.4	255	3430	12	0.58	21.3	286	-0.7	24.8

Примечание. Н.О. — остаток, не растворимый в 10%-ной HCl; \* — изотопный C—O анализ выполнен Э.М. Прасоловым в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург).

Таблица 2. U—Pb аналитические данные для доломитов билляхской серии

Номер образца	U, мкг/г	Pb, мкг/г	$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Юмастахская свита (верхняя подсвита)						
1100/5*	0.0513	0.106	34.6	26.385	16.120	39.482
1103/1	0.0241	0.0322	53.6	27.771 27.668	16.524 16.501	37.578 37.633
1104/1	0.0878	0.201	29.5	23.947 23.856	16.157 16.149	37.146 37.154
2043/1	0.0584	0.239	16.4	22.747	16.051	38.036
2050/1*	—	0.0742	—	34.580	17.656	38.505
2059/3	0.0762	0.221	25.4	25.869	16.301	41.948
3087/2	0.401	0.409	81.9	39.960	17.645	38.364
3087/4	0.136	0.201	52.2	32.771	17.026	38.505
6010/2	0.0931	0.268	22.3	20.776	15.806	36.763
Юмастахская свита (нижняя подсвита)						
1099/1	0.0995	0.386	17.5	22.462	16.010	39.403
1099/2	—	0.570	—	18.900	15.685	37.045
2048/3	0.0565	0.156	24.9	24.469	16.202	38.256
3086/2	0.0325	0.225	9.24	19.962	15.781	37.069
3086/3	0.0589	0.0963	47.6	33.277	17.030	38.808
3086/4	0.174	0.702	17.12	23.218	16.080	39.704
Котуйканская свита						
1076/2	0.0863	0.301	18.2	20.229	15.825	36.568
1093/1	0.0346	0.729	2.97	17.835	15.591	37.811
1094/2	0.0582	5.20	0.685	17.181	15.505	36.979
3075/1	0.134	0.504	17.4	21.233	15.914	37.301
3075/2	0.181	0.485	25.7	25.259	16.250	36.950
3075/5*	0.0695	0.166	29.1	25.952	16.220	37.162

Примечание. \* — образцы, точки которых отклоняются от Pb—Pb изохроны и поэтому не учитывались при вычислении Pb—Pb возраста.

шей. Содержания Mn, Fe и Sr в карбонатном материале этих пород колеблются в пределах соответственно 67–255, 979–3430 и 12–24 мкг/г, а отношения Mn/Sr и Fe/Sr лежат соответственно в интервалах 2.8–21.3 и 53–286. Величины  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются соответственно от  $-3.0$  до  $-0.5\text{‰}$  и от 24.8 до 26.2‰.

**Юсмастахская свита.** В 6 образцах нижней подсвиты содержание некарбонатной примеси составляет 2–6%. Отношение Mg/Ca варьирует в пределах 0.58–0.62 и близко к стехиометрической величине в доломите (0.61). Диапазон колебаний содержаний Mn, Fe и Sr в карбонатной составляющей пяти образцов невелик – соответственно 44–70, 518–840 и 11–17 мкг/г, но эти содержания резко возрастают в обр. 3086/4 до 1080, 10700 и 28 мкг/г соответственно. Естественно, в этом образце наблюдаются и аномальные величины отношений Mn/Sr и Fe/Sr, соответственно 38.6 и 382. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в обр. 3086/4 (соответственно  $-0.7$  и 26.6‰) также выбиваются из общей картины для нижней подсвиты, где они лежат в интервалах от  $-0.1$  до  $+0.4$  и 23.7–25.5‰ соответственно.

Содержания некарбонатной составляющей в 8 из 9 образцов доломитов верхней подсвиты невелики (1–4%), но один из проанализированных образцов (обр. 2059/3) содержит 15% нерастворимого остатка. Отношение Mg/Ca в карбонатном материале так же, как и в нижней подсвите, варьирует в пределах 0.58–0.62. Содержания Mn, Fe и Sr в карбонатной составляющей девяти образцов доломитов колеблются в интервалах 36–108, 520–1610 и 13–28 мкг/г соответственно, а пределы вариаций отношений Mn/Sr и Fe/Sr в этих образцах составляют соответственно 1.3–7.2 и 24–119. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в доломитах верхней подсвиты изменяются соответственно от  $-0.8$  до  $+0.8\text{‰}$  и от 24.4 до 27.3‰.

Таким образом, значения  $\delta^{18}\text{O}$  во всех доломитах превышают пороговую величину 20.6‰, которая, как будет показано ниже, определяет пригодность образцов для получения С-изотопной хемотратиграфической информации. Интервалы вариаций  $\delta^{13}\text{C}$  составляют: в котуйканской свите от  $-3.0$  до  $-0.5\text{‰}$ , в юсмастахской свите от  $-0.8$  до  $+0.8\text{‰}$ .

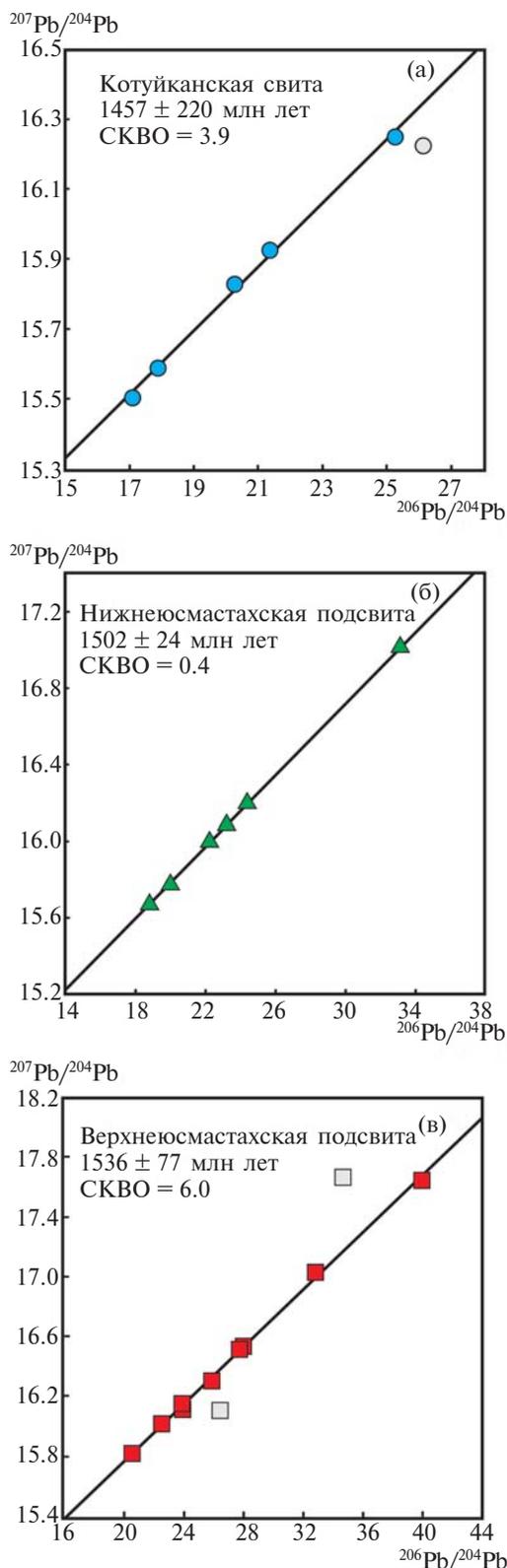
**U–Pb изотопная систематика доломитов.** Концентрации U и Pb и изотопный состав Pb определены в 21 образце доломитов билляхской серии (в 6 образцах котуйканской свиты и 15 образцах юсмастахской свиты) (табл. 2).

**Котуйканская свита.** Доломиты котуйканской свиты содержат 0.0346–0.181 мкг/г U и 0.301–5.20 мкг/г Pb, причем отношение  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  в этих породах изменяется в диапазоне 0.685–29.1. Изотопное отношение

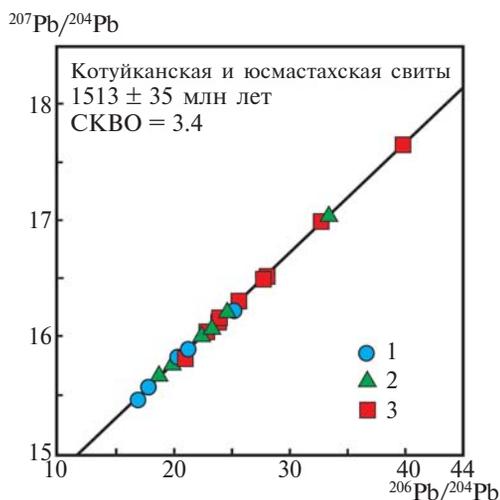
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в доломитах котуйканской свиты варьирует в диапазоне 17.181–25.952, отношение  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  – в диапазоне 15.505–16.250 и отношение  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  – в диапазоне 36.568–37.811.

**Юсмастахская свита.** В доломитах юсмастахской свиты содержание U колеблется в пределах 0.0241–0.401 мкг/г (в нижней подсвите – 0.0325–0.174 мкг/г, в верхней – 0.0241–0.401 мкг/г), а Pb – в пределах 0.032–0.702 мкг/г (в нижней подсвите – 0.096–0.702 мкг/г, в верхней – 0.032–0.409 мкг/г). Изотопные отношения  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в этих породах лежат соответственно в пределах 18.900–39.960 (18.900–33.277 в нижней подсвите и 22.747–39.960 в верхней), 15.685–17.656 (15.685–17.030 в нижней подсвите и 15.806–17.656 в верхней) и 36.763–41.948 (37.045–39.704 в нижней подсвите и 36.763–41.948 в верхней).

На графиках в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  фигуративные точки, представляющие котуйканскую свиту и нижнюю и верхнюю подсвиты юсмастахской свиты (рис. 4), располагаются вдоль прямых линий, наклоны которых одинаковы в пределах аналитических погрешностей и отвечают соответственно Pb–Pb возрастам  $1457 \pm 220$ ,  $1502 \pm 24$  и  $1536 \pm 77$  млн лет. На этих графиках три точки, отвечающие образцам 1100/5, 2050/1 и 3075/5, отклоняются от аппроксимирующих прямых, и существующие отклонения пока не удается объяснить какими-либо минералогическими или геохимическими причинами. Поэтому указанные образцы исключены из дальнейших вычислений. Объединенная Pb–Pb изохрона для всей совокупности проанализированных билляхских доломитов (котуйканской и юсмастахской свит), включающая оставшиеся 18 образцов (рис. 5), дает возраст  $1513 \pm 35$  млн лет при СКВО = 3.4. Небольшой избыточный разброс точек, превышающий аналитическую погрешность и определяющий повышенную величину СКВО = 3.4 в заключительной выборке, включающей 18 доломитов билляхской серии, может свидетельствовать либо о контаминации карбонатной составляющей свинцом силикокластической примеси (полевые шпаты содержат обычно на два порядка больше Pb, чем доломиты), либо о нарушении на протяжении геологической истории пород U–Pb систем в изученных образцах, либо, наконец, о несколько различном изотопном составе первичного Pb в доломитах изученных стратиграфических подразделений. Первая из этих причин кажется наименее вероятной, во-первых, потому, что содержание некарбонатной примеси в большинстве изученных образцов мало и не превышает 4% (табл. 1), а во-вторых, потому, что точки доломитов с повышенным содержанием такой примеси (5–6%) характеризуются наи-



**Рис. 4.** График  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для образцов доломитов билляхской серии. (а) – котуйканская свита, (б) – нижнеюсматахская подсвита, (в) – верхнеюсматахская подсвита. Светло-серым показаны образцы, точки которых отклоняются от Pb–Pb изохроны и не учитывались при вычислении Pb–Pb возраста.



**Рис. 5.** Объединенная изохрона в координатах  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для 18 образцов доломитов котуйканской и юсматахской свит. 1 – котуйканская свита, 2 – нижняя подсвита юсматахской свиты, 3 – верхняя подсвита юсматахской свиты.

меньшими отклонениями от аппроксимирующей прямой линии на рис. 5. Вторая причина представляется возможной в связи с тем, что в большей части изученных доломитов отношение Mg/Ca меньше стехиометрического (0.61) и подразумевает присутствие в минералах некоторого количества кальцита, который может быть результатом эпигенетического преобразования карбонатного материала. Третья причина обусловлена возможностью различия условий диагенеза и соответственно состава (в том числе изотопного) диагенетических флюидов, контактировавших с доломитами в различных частях разреза билляхской серии. Эта причина представляется наиболее вероятной, так как вычисление показывает небольшое плавное изменение изотопных отношений первичного Pb в изученных доломитах от котуйканской свиты ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.341 \pm 0.022$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.451 \pm 0.010$ ) к нижней ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.229 \pm 0.004$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.429 \pm 0.002$ ) и верхней ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.129 \pm 0.022$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.401 \pm 0.011$ ) подсвитам юсматахской свиты.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

**Карбонатные породы билляхской серии как источник хеостратиграфической информации.** Карбонатные породы, и в частности доломиты, являются важным источником хеостратиграфической информации, так как способны при определенных условиях отражать первичные C–O изотопные характеристики среды седиментации. Высокое содержание углерода в доломитах в сочетании с низкой его концентрацией в эпигенетических растворах способ-

ствует сохранению первичного значения  $\delta^{13}\text{C}$  в этих карбонатных породах.

В качестве одного из критериев сохранности первичных С-изотопных систем докембрийских карбонатов используется отношение  $\text{Mn}/\text{Sr}$ , пороговые значения которого для доломитов у разных авторов варьируют от  $\text{Mn}/\text{Sr} < 10$  (Kaufman, Knoll, 1995; Knoll et al., 1995) до  $\text{Mn}/\text{Sr} < 6$  (Семихатов и др., 2004, 2009; Кузнецов и др., 2006). Кроме того, показано, что величина  $\delta^{18}\text{O}$  в неизмененных (“лучших”) морских карбонатах верхнего протерозоя составляет  $24.2 \pm 2.5\%$  (Veizer, Hoefs, 1976; Ray et al., 2003), а в эпигенетически измененных карбонатных породах опускается ниже  $20.6\%$  (Kaufman, Knoll, 1995). Учитывая изложенное, в настоящей работе при выборе образцов доломитов, пригодных для реконструкции изотопного состава углерода в протерозойской морской воде, отдавалось предпочтение тем из них, которые не несут внешних признаков вторичных изменений, содержат низкую долю силикокластической примеси, характеризуются отношением  $\text{Mn}/\text{Sr} < 6$ , значениями  $\delta^{18}\text{O} \geq 20.6\%$  и достаточно удалены от поверхностей размыва.

Значения  $\delta^{18}\text{O}$  ( $23.6\text{--}28.1\%$ ) во всех изученных образцах котуйканской и юсмастахской свит превышают пороговую величину  $20.6\%$  (табл. 1). Однако критерию  $\text{Mn}/\text{Sr} < 6$  соответствуют в котуйканской свите лишь 2 образца из 6, а в юсмастахской — 11 образцов из 15 (в нижней подсвите — 4 из 6, в верхней — 7 из 9). Соответственно диапазоны валидных значений  $\delta^{13}\text{C}$  составляют: в доломитах котуйканской свиты от  $-3.0\%$  до  $-0.4\%$ , а в доломитах юсмастахской свиты от  $-0.8\%$  до  $+0.8\%$  (в нижней подсвите от  $-0.1\%$  до  $+0.4\%$ , в верхней — от  $-0.8\%$  до  $+0.8\%$ ). Эти результаты согласуются с данными, полученными ранее для доломитов котуйканской свиты (от  $-1.7$  до  $-0.7\%$ ; Покровский, Виноградов, 1991, и от  $-2.7$  до  $-0.7\%$ ; Knoll et al., 1995) и юсмастахской свиты (от  $-0.6$  до  $+0.4\%$ ; Покровский, Виноградов, 1991, и от  $-1.6$  до  $+1.2\%$ ; Knoll et al., 1995), и вообще характерны для карбонатных пород раннего и начала среднего рифея (Семихатов и др., 2009).

**Изотопная геохронология карбонатных пород билляхской серии.** Единое значение  $\text{Rb}-\text{Pb}$  возраста  $1513 \pm 35$  млн лет, полученное для доломитов котуйканской и юсмастахской свит, в сочетании с ранее опубликованным нами  $\text{Rb}-\text{Sr}$  возрастом глауконита из нижележащей усть-ильинской свиты ( $1483 \pm 10$  млн лет; Горохов и др., 1991; Gogokhov et al., 1991) позволяет предполагать, что осадки всех трех свит билляхской серии отлагались около 1.5 млрд лет назад в ходе единого непродолжительного цикла. При этом описанные перерывы между подсви-

тами (Злобин, 1968; Шпунт и др., 1982) представляют собой локальные седиментологические несогласия или диастемы. Эта оценка возраста относит билляхскую серию в полном объеме к нижнему рифею (Семихатов и др., 2015).

Недавно опубликованные  $\text{Rb}-\text{Sr}$  и  $\text{K}-\text{Ar}$  датировки Al-глауконита из нижней подсвиты юсмастахской свиты (соответственно  $1401 \pm 10$  и  $1417 \pm 44$  млн лет; Зайцева и др., 2016) и ранее полученный  $\text{Rb}-\text{Sr}$  возраст усть-ильинских глауконитов (Горохов и др., 1991; Gogokhov et al., 1991) уже явились важным свидетельством принадлежности значительной части билляхской серии к нижнему рифею. В обоих случаях изотопно-геохронологическое изучение мономинеральных размерных и плотностных фракций глобулярных слоистых силикатов сопровождалось моделированием распределения октаэдрических катионов и сопоставлением полученных результатов с данными мессбауэровской спектроскопии. В основе использованного подхода лежит предположение о том, что формирование и преобразование  $\text{Rb}-\text{Sr}$  и  $\text{K}-\text{Ar}$  систем в глобулярных слоистых силикатах синхронны с этапами структурной эволюции последних и определяются событиями геологической и геохимической истории осадочных толщ (Горохов и др., 1995б, 1997б; Зайцева и др., 2008, 2016, 2017).

Однако несмотря на то, что моделирование распределения октаэдрических катионов в сочетании с получением реальных мессбауэровских спектров в большинстве изученных до сих пор ситуаций позволяет отличить “омоложенные” возрастные значения от стратиграфически значимых (Зайцева и др., 2016, 2017), в случае юсмастахского Al-глауконита, как следует из результатов настоящей работы, достигнуть такой цели не удалось. Возможно, это произошло потому, что, как отмечали сами авторы вышеупомянутой статьи (Зайцева и др., 2016), распределение катионов в октаэдрической сетке упомянутого нижнеюсмастахского Al-глауконита лишь приближенно можно считать упорядоченным, отвечающим стадии диагенеза и определяющим отсутствие каких-либо последующих нарушений, так как при моделировании в данном случае не учитывалось наличие триоктаэдрических фрагментов (хлоритовых слоев) в структуре этого сложного смешанослойного минерала. Во всяком случае, статистический параметр  $R$ , отражающий меру идентичности моделированного и экспериментально полученного мессбауэровских спектров и в случае их полного совпадения стремящийся к единице, для упомянутого Al-глауконита оказался равным 7.7, тогда как, например, для глауконитов усть-ильинской свиты его величина была более чем в два раза меньше ( $R = 2.9$ ; Зайцева и др., 2016). Поэтому

допустимые пределы отклонения этого параметра от единицы при кристаллохимических исследованиях еще предстоит оценить для того, чтобы с его помощью можно было проводить корректную оценку стратиграфического значения Rb—Sr и K—Ar изотопных датировок.

В пользу предположения о том, что весь комплекс осадков билляхской серии отлагался на протяжении относительно короткого интервала времени, а описанные перерывы между ее отдельными подразделениями (Злобин, 1968; Шпунт и др., 1982), вероятно, представляют собой диаастемы, могут свидетельствовать не только близкие изотопно-углеродные данные для карбонатных пород котуйканской и юсмастахской свит, но и ранее опубликованные Б.Г. Покровским и В.И. Виноградовым (1991) и недавно подтвержденные нами (Горохов и др., 2018) результаты изотопного анализа Sr в доломитах билляхской серии. Величины  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в этих породах оставались практически постоянными за время накопления карбонатных отложений всей серии. Диапазоны вариаций первичного отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в доломитах котуйканской и юсмастахской свит, приведенные в статье Б.Г. Покровского и В.И. Виноградова, составляют соответственно 0.70464–0.70594 и 0.70368–0.70521 и согласуются с этими значениями в океане раннего рифея (Кузнецов и др., 2014).

Следует отметить, что в рифее это не единственный случай, когда Pb—Pb возраст карбонатных пород согласуется с возрастами прорывающих силлов и интрузий. Одним из первых удачных примеров являются изотопно-геохронологические данные для пород гипостратотипа рифея в Учуро-Майском регионе Сибири. Pb—Pb возраст известняков нерюенской свиты из основания лахандинской серии равен  $1025 \pm 40$  млн лет (Семихатов и др., 2000). При этом U—Pb возраст бадделеита из синседиментационных силлов, залегающих вблизи кровли этой серии, составляет  $1005 \pm 4$  и  $974 \pm 7$  млн лет (Rainbird et al., 1998), а Sm—Nd возраст этих же силлов —  $981 \pm 69$  млн лет (Павлов и др., 2002).

Другим примером можно считать развитую в центральной части Индии серию Семри (800–1000 м), которая в нижней части разреза содержит известняковые формации Кайрахат и Рохтас. Формация Кайрахат согласно перекрыта терригенной формацией Деонар, содержащей туфы с цирконами, U—Pb возрасты которых составляют  $1631 \pm 6$  и  $1628 \pm 8$  млн лет (Ray et al., 2002; Rasmussen et al., 2002). В верхней части разреза Pb—Pb возраст известняков формации Рохтас ( $1599 \pm 48$  млн лет; Sarangi et al., 2004) согласуется с U—Pb возрастом цирконов из туфов, залегающих вблизи кровли этой же формации

( $1602 \pm 10$  и  $1599 \pm 8$  млн лет; Rasmussen et al., 2002). Устойчивые отрицательные значения  $\delta^{13}\text{C}$ , свойственные известнякам формации Рохтас (от  $-1.8$  до  $0\%$ ; Ray et al., 2003), согласуются со значениями  $\delta^{13}\text{C}$  в доломитах котуйканской свиты. В известняках формаций Кайрахат и Рохтас, отвечающих жестким геохимическим критериям сохранности Rb—Sr изотопных систем ( $\text{Mn}/\text{Sr} < 0.2$ ,  $\text{Fe}/\text{Sr} < 5$  и  $\text{Mg}/\text{Ca} < 0.024$ ; Кузнецов и др., 2014), первичное отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  варьирует от 0.70460 до 0.70494.

**Сравнение изотопных характеристик анабарских отложений и карбонатных пород других районов мира.** Полученные изотопно-геохронологические и C- и Sr-хемотратиграфические характеристики доломитов билляхской серии можно сравнить с соответствующими величинами в карбонатных породах, находящихся в едином возрастном диапазоне с котуйканской и юсмастахской свитами.

Бурзянская серия, стратотип нижнего рифея на Южном Урале, включает две согласно залегающие карбонатсодержащие свиты — саткинскую и бакальскую. Pb—Pb возрасты известняков названных свит равны  $1550 \pm 30$  и  $1430 \pm 30$  млн лет соответственно (Кузнецов и др., 2003, 2005, 2008). U—Pb возраст цирконов из габброидов ( $1389 \pm 28$  млн лет; Ронкин и др., 2007) и гранитов рапакиви ( $1386 \pm 5$  млн лет; Пучков и др., 2013), прорывающих саткинские карбонаты, и U—Pb возраст бадделеита из диабазов Главной Дайки, рвущей отложения бакальской свиты ( $1385 \pm 1.4$  млн лет; Пучков и др., 2013), ограничивают минимальный возрастной предел карбонатных пород бурзянской серии. Интервалы вариаций  $\delta^{13}\text{C}$  (от  $-0.7$  до  $0.0\%$ ) и отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (от 0.70460 до 0.70494) в карбонатах саткинской и бакальской свит (Семихатов и др., 2009) совпадают с интервалом вариаций этих параметров в доломитах билляхской серии.

Надсерия Белт (Скалистые горы Северной Америки) содержит в базальных и терминальных горизонтах синседиментационные силлы с U—Pb возрастом цирконов  $1468 \pm 3$  и  $1401 \pm 6$  млн лет (Sears et al., 1998; Ross, Villeneuve, 2003). Значения  $\delta^{13}\text{C}$  в карбонатах формаций Хелена и Сайх надсерии Белт колеблются от  $-0.8$  до  $+2.5\%$  (Hall, Veizer, 1996), приближаясь к диапазону в доломитах юсмастахской свиты. В той же надсерии в двух образцах известняков из формации Ньюленд с относительно низкими отношениями Mn/Sr (0.27 и 0.40) значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  составляют 0.70484 и 0.70514 (Hall, Veizer, 1996).

Терригенно-доломитовая кютингдинская свита Оленекского поднятия Северной Сибири в верхней части рассечена силлом, который содержит бадделеит с U—Pb возрастом  $1473 \pm 24$  млн лет (Wingate et al., 2009). Первичное отношение

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в образце доломита из этой свиты, который включает <1% силикокластической примеси и имеет отношение Mn/Sr 6.6, составляет 0.70465 (Горохов и др., 1995а).

Таким образом, приведенные данные определяют надежность установленного раннерифейского возраста доломитов билляхской серии. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  и отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в этих доломитах соответствуют аналогичным величинам в карбонатных осадках, отложенных 1630–1400 млн лет назад.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Pb–Pb анализ доломитов котуйканской и юсмастакской свит билляхской серии впервые дает прямую изотопно-геохронологическую характеристику осадочных пород рифейского чехла Анабарского поднятия. Установленный Pb–Pb возраст по образцам двух свит равен  $1513 \pm 35$  млн лет (СКВО = 3.4), что в сочетании с опубликованным ранее Rb–Sr возрастом глауконита нижележащей усть-ильинской свиты (Горохов и др., 1991; Gorokhov et al., 1991) значительно сокращает стратиграфический объем билляхской серии. Заложение раннерифейского палеобассейна на Анабарском поднятии произошло в ходе инициализации внутриплитного растяжения Сибирского кратона в начале мезопротерозоя около 1.5–1.4 млрд лет назад. Однако заполнение этого палеобассейна, объединяющего отложения терригенной мукунской и карбонатной билляхской серий, завершилось до внедрения габбро-долеритовых даек и силлов котуйского комплекса и до заложения куонамской магматической провинции (Ernst et al., 2000; Эрнст и др., 2016; Wingate et al., 2009).

Компиляция изотопно-геохронологических данных позволяет предполагать, что осадки всех свит билляхской серии отлагались в ходе единого непродолжительного (длительностью не более 10 млн лет) цикла. Этот вывод подкрепляется хемотратиграфическими C- и Sr-изотопными данными для доломитов билляхской серии (Покровский, Виноградов, 1991; Knoll et al., 1995; Горохов и др., 2018), которые показывают, что за время накопления отложений серии величины  $\delta^{13}\text{C}$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в этих породах оставались практически постоянными.

Полученные изотопно-геохронологические результаты с высокой степенью надежности свидетельствуют о принадлежности всей осадочной последовательности, объединяемой под названием “билляхская серия”, к нижнему рифею (Семихатов и др., 2015). Представленные данные предполагают недостаточную обособанность выделения в составе этой серии нескольких разновозрастных свит (Государственная...,

2016) и ставят точку в дискуссиях о возрастном положении ее отдельных стратиграфических подразделений, которые сопровождали биостратиграфическое, хемотратиграфическое и изотопно-геохронологическое изучение пород серии на протяжении полувека. Новые геохронологические данные следует учитывать и при проведении очередного этапа геолого-съемочных работ на этой территории.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-05-00367).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бибикова Е.В., Белов А.Н., Грачева Т.В., Макаров В.А., Розен О.М., Сумин Л.В. Метаморфическая история раннеархейских пород Анабарского щита // Изотопное датирование процессов метаморфизма и метасоматоза. М.: Наука, 1987. С. 139–153.
- Вейс А.Ф., Воробьева Н.Г. Микрофоссилии рифея и венда Анабарского массива // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1992. № 1. С. 114–130.
- 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. АН. 2001. Т. 378. № 4. С. 511–517.
- Гаррис М.А., Казаков Г.А., Келлер Б.М., Полевая Н.И., Семихатов М.А. Геохронологическая шкала верхнего протерозоя (рифей и венд) // Международный геол. конгресс, 22-я сессия. Доклады советских геологов. Проблема 3. Абсолютный возраст геологических формаций. М.: Наука, 1964. С. 431–455.
- Глуховский М.З., Кузьмин М.И., Баянова Т.Б., Баженова Г.Н., Лялина Л.М., Серов П.А. Автономные анортозиты Анабарского щита: возраст, геохимия и механизм образования // Докл. АН. 2015. Т. 464. № 4. С. 457–463.
- Голованов Н.П. Строматолиты верхнедокембрийских отложений западного склона Анабарского поднятия // Опорный разрез верхнедокембрийских отложений западного склона Анабарского поднятия. Л.: НИИГА, 1970. С. 60–88.
- Головенко В.К., Белова М.Ю. Докембрийские микрофоссилии в кремнях билляхской серии Анабарского поднятия // Палеонтол. журн. 1984. № 4. С. 20–30.
- Горохов И.М., Семихатов М.А., Друбецкой Е.Р., Ивановская Т.А., Кутявин Э.П., Мельников Н.Н., Турченко Т.Л., Ципурский С.И., Яковлева О.В. Rb–Sr и K–Ar возраст осадочных геохронометров нижнего рифея Анабарского массива // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 7. С. 17–32.
- Горохов И.М., Семихатов М.А., Баскаков А.В., Кутявин Э.П., Мельников Н.Н., Сочава А.В., Турченко Т.Л. Изотопный состав стронция в карбонатных породах рифея, венда и нижнего кембрия Сибири // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1995а. Т. 3. № 1. С. 3–33.

- Горохов И.М., Яковлева О.В., Семихатов М.А., Ивановская Т.А. Rb–Sr и K–Ar возраст и мессбауэровские спектры глобулярных слоистых силикатов глауконитового ряда: дебенгдинская свита среднего рифея Оленекского поднятия, Северная Сибирь // Литология и полезн. ископаемые. 1995б. № 6. С. 615–631.
- 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 полезн. ископаемые. 1997а. № 5. С. 530–539.
- Горохов И.М., Яковлева О.В., Семихатов М.А., Мельников Н.Н., Ивановская Т.А., Кутявин Э.П. “Омоложенный” Al–глауконит в пограничных венд-кембрийских отложениях Подольского Приднестровья (Украина): Rb–Sr и K–Ar систематика и <sup>57</sup>Fe мессбауэровские спектры // Литология и полезн. ископаемые. 1997б. № 6. С. 616–635.
- Горохов И.М., Семихатов М.А., Мельников Н.Н., Турченко Т.Л., Константинова Г.В., Кутявин Э.П. Rb–Sr геохронология среднерифейских аргиллитов юсмастаской свиты, Анабарский массив, Северная Сибирь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2001. Т. 9. № 3. С. 3–24.
- Горохов И.М., Семихатов М.А., Турченко Т.Л., Петров П.Ю., Мельников Н.Н., Константинова Г.В., Кутявин Э.П. Rb–Sr геохронология вендских аргиллитов старореченской свиты (Анабарский массив, Северная Сибирь) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2010. Т. 18. № 5. С. 16–27.
- Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Константинова Г.В., Дубинина Е.О., Липенков Г.В. Изотопная хемотратиграфия и геохронология протерозойских осадочных пород Анабарского поднятия (Северная Сибирь) // Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. VII Российская конференция по изотопной геохронологии. Москва, 5–7 июня 2018 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 96–99.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Анабаро-Вилуйская. Лист R-48 – Хатанга. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 293 с.
- Гусев Н.И., Руденко В.Е., Бережная Н.Г., Скублов С.Г., Морева Н.В., Ларионов А.Н., Лепехина Е.Н. Возраст гранулитов далдынской серии Анабарского щита // Региональная геология и металлогения. 2012. № 52. С. 29–38.
- Зайцева Т.С., Горохов И.М., Ивановская Т.А., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Мельников Н.Н., Аракелянц М.М., Яковлева О.В. Мессбауэровские характеристики, минералогия и изотопный возраст (Rb–Sr, K–Ar) верхнерифейских глауконитов укской свиты Южного Урала // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2008. Т. 16. № 3. С. 3–25.
- Зайцева Т.С., Семихатов М.А., Горохов И.М., Сергеев В.Н., Кузнецов А.Б., Ивановская Т.А., Мельников Н.Н., Константинова Г.В. Изотопная геохронология и биостратиграфия рифейских отложений Анабарского массива, Северная Сибирь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2016. Т. 24. № 6. С. 3–29.
- Зайцева Т.С., Горохов И.М., Семихатов М.А., Ивановская Т.А., Кузнецов А.Б., Доржиева О.В. Rb–Sr и K–Ar возраст глобулярных слоистых силикатов и биостратиграфия рифейских отложений Оленекского поднятия, Северная Сибирь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2017. Т. 25. № 6. С. 3–29.
- Злобин М.Н. О расчленении билляхской серии синийского комплекса // Ученые записки НИИГА. Региональная геология. 1968. Вып. 13. С. 135–143.
- Каурова О.К., Овчинникова Г.В., Горохов И.М. U–Th–Pb систематика докембрийских карбонатных пород: определение возраста формирования и преобразования карбонатных осадков // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2010. Т. 18. № 3. С. 27–44.
- Комар Вл.А. Строматолиты верхнедокембрийских отложений севера Сибирской платформы и их стратиграфическое значение. М.: Наука, 1966. 114 с.
- Крылов И.Н. Строматолиты рифея и фанерозоя СССР. М.: Наука, 1975. 220 с.
- Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Каурова О.К., Крупенин М.Т., Маслов А.В. Sr–изотопная характеристика и Pb–Pb возраст известняков бакальской свиты (типовой разрез нижнего рифея, Южный Урал) // Докл. АН. 2003. Т. 391. № 6. С. 794–798.
- Кузнецов А.Б., Крупенин М.Т., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Маслов А.В., Каурова О.К., Эльмис Р. Формирование и преобразование карбонатных пород и сидеритовых руд бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал): Sr–изотопная характеристика и Pb–Pb возраст // Литология и полезн. ископаемые. 2005. № 3. С. 227–249.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Маслов А.В., Горохов И.М., Прасолов Э.М., Крупенин М.Т. Sr– и S–изотопная хемотратиграфия типового разреза верхнего рифея (Южный Урал): новые данные // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2006. Т. 14. № 6. С. 25–53.
- Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Семихатов М.А., Горохов И.М., Каурова О.К., Крупенин М.Т., Васильева И.М., Гороховский Б.М., Маслов А.В. Sr–изотопная характеристика и Pb–Pb возраст карбонатных пород саткинской свиты, нижнерифейская бурзянская серия Южного Урала // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2008. Т. 16. № 2. С. 16–34.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Возможности стронциевой изотопной хемотратиграфии в решении проблем стратиграфии верхнего протерозоя (рифей и венда) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2014. Т. 22. № 6. С. 3–25.
- Мельников Н.Н. Эффективность метода двойного изотопного разбавления при масс-спектрометрическом анализе свинца для геохронологии // Геохимия. 2010. № 8. С. 876–886.
- Овчинникова Г.В., Васильева И.М., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Горохов И.М., Гороховский Б.М., Левский Л.К. U–Pb систематика карбонатных пород протерозоя: инзерская свита стратотипа верхнего рифея (Южный Урал) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1998. Т. 6. № 4. С. 20–31.
- Овчинникова Г.В., Васильева И.М., Семихатов М.А., Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Горохов-

ский Б.М., Левский Л.К. Возможности Pb–Pb датирования карбонатных пород с открытыми U–Pb системами: миньярская свита стратотипа верхнего рифея, Южный Урал // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2000. Т. 8. № 6. С. 3–19.

Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Мележик В.А., Горохов И.М., Васильева И.М., Гороховский Б.М. Pb–Pb возраст ятулийских карбонатных пород: туломозерская свита юго-восточной Карелии // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2007. Т. 15. № 4. С. 20–33.

Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Горохов И.М., Летникова Е.Ф., Гороховский Б.М. U–Pb возраст и Sr-изотопная характеристика известняков неопротерозойской цаганоломской свиты, бассейна р. Дзабхан, Западная Монголия // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2012. Т. 20. № 6. С. 28–40.

Павлов В.Э., Галле И., Петров П.Ю., Журавлев Д.З., Шацлло А.В. Уйская серия и позднепротерозойские силлы Учуро-Майского района: изотопные и палеомагнитные данные, и проблема суперконтинента Родиния // Геотектоника. 2002. № 4. С. 24–41.

Петров П.Ю. Мукунский бассейн: обстановки, параметры палеосреды и факторы континентальной терригенной седиментации раннего мезопротерозоя (нижний рифей Анабарского поднятия Сибири) // Литология и полезн. ископаемые. 2014. № 1. С. 60–88.

Покровский Б.Г., Виноградов В.И. Изотопный состав стронция, кислорода и углерода в верхнекембрийских карбонатах западного склона Анабарского поднятия (р. Котуйкан) // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320. № 5. С. 1245–1250.

Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Сергеева Н.Д. Новое в стратиграфии стратотипического разреза рифея // Общая стратиграфическая шкала России: состояние и проблемы обустройства. Всероссийская конференция, Москва, 23–25 мая 2013 г. Сборник статей. Отв. ред. Федонкин М.А. М.: ГИН РАН, 2013. С. 70–72.

Розен О.М., Журавлев Д.З., Суханов М.К., Бибилова Е.В., Злобин В.Л. Изотопно-геохимические и возрастные характеристики раннепротерозойских террейнов, коллизионных зон и связанных с ними анортозитов на северо-востоке Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 2. С. 163–179.

Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Казак А.П., Матуков Д.И., Лепихина О.П. Граница нижнего и среднего рифея на Южном Урале: новые изотопные U–Pb SHRIMP-II ограничения // Докл. АН. 2007. Т. 415. № 3. С. 370–376.

Савицкий В.Е., Соболевская Р.Ф. Геологическое строение района правобережья нижнего течения р. Котуй (бассейны рек Котуйкан и Медвежья). Отчет о геологической съемке м-ба 1 : 1 000 000, произведенной партией № 2 экспедиции № 80 в 1954 г. Л., 1955. Красноярский ТФГИ, № 7069.

Семихатов М.А. Методическая основа стратиграфии рифея // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1995. Т. 3. № 6. С. 33–50.

Семихатов М.А., Серебряков С.Н. Сибирский гипостратотип рифея. М.: Наука, 1983. 223 с. (Тр. ГИН АН СССР. Вып. 367).

Семихатов М.А., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Гороховский Б.М., Подковыров В.Н. Изотопный возраст границы среднего и верхнего рифея: Pb–Pb геохронология карбонатных пород лахандинской серии, Восточная Сибирь // Докл. АН. 2000. Т. 372. № 2. С. 216–221.

Семихатов М.А., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Каурова О.К., Петров П.Ю. Pb–Pb изохронный возраст и Sr-изотопная характеристика верхнеюдомских карбонатных отложений (венд Юдомо-Майского прогиба, Восточная Сибирь) // Докл. АН. 2003. Т. 393. № 1. С. 83–87.

Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Подковыров В.Н., Бартли Дж., Давыдов Ю.В. Юдомский комплекс стратотипической местности: С-изотопные хемотратиграфические корреляции и соотношение с вендом // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2004. Т. 12. № 5. С. 3–29.

Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Маслов А.В., Горохов И.М., Овчинникова Г.В. Стратотип нижнего рифея – бурзянская серия Южного Урала: литостратиграфия, палеонтология, геохронология, Sr- и С-изотопные характеристики карбонатных пород // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2009. Т. 17. № 6. С. 17–45.

Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М. Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифей и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 16–27.

Сергеев В.Н., Воробьева Н.Г., Петров П.Ю. Новые местонахождения рифейских микробиот в билляхской серии Северного Прианбарья (бассейн р. Фомич): к вопросу о биостратиграфии рифея Сибирской платформы // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2007. Т. 15. № 1. С. 3–14.

Смелов А.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Березкин В.И., Кравченко А.А., Добрецов В.Н., Великославинский С.Д., Яковлева С.З. Возраст и продолжительность формирования билляхской зоны тектонического меланжа, Анабарский щит // Петрология. 2012. Т. 20. № 3. С. 315–330.

Стратиграфия синийских и кембрийских отложений северо-востока Сибирской платформы. Ред. Ткаченко Б.В. Л.: Гостоптехиздат, 1959. 211 с. (Труды НИИГА. Т. 101).

Тарасов Л.С., Гаврилов Е.Я., Лебедев В.И. Об абсолютном возрасте пород Анабарского докембрия // Геохимия. 1963. № 12. С. 1145–1151.

Хоментовский В.В., Шенфиль В.Ю., Яншин М.С., Бутаков Е.П. Опорные разрезы отложений верхнего докембрия и нижнего кембрия Сибирской платформы. М.: Наука, 1972. 356 с.

Шпунт Б.Р., Шаповалова И.Г., Шамшина Э.А. Поздний докембрий севера Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1982. 225 с.

Эрнст Р.Е., Округин А.В., Веселовский Р.В., Камо С.Л., Гамильтон М.А., Павлов В.Э., Сёдерlund У., Чемберлейн К.Р., Роджерс К. Куонамская

- крупная изверженная провинция (север Сибири, 1501 млн лет): U–Pb геохронология, геохимия и корреляция с синхронным магматизмом других кратонов // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 5. С. 833–855.
- Якшин М.С.* Водорослевая микропроблематика нижнего рифея Анабарского поднятия. Новосибирск: Наука, 1991. 61 с.
- Babinski M., Chemale F., Jr., Van Schmus W.R.* The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilatero Ferrifero, Brazil // Precambrian Res. 1995. V. 72. № 3/4. P. 235–245.
- Babinski M., Vieira L.C., Trindade R.I.F.* Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambui Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events // Terra Nova. 2007. V. 19. № 6. P. 401–406.
- Bolhar R., Hofmann A., Woodhead J., Hergt J., Dirks P.* Pb and Nd isotope systematics of stromatolitic limestones from the 2.7 Ga Ngezi Group of the Belingwe Greenstone Belt: constraints on timing of deposition and provenance // Precambrian Res. 2002. V. 114. № 3/4. P. 277–294.
- Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D.* Integrated paleomagnetism and U–Pb geochronology of mafic dikes of the eastern Anabar Shield region, Siberia: implications for Mesoproterozoic paleolatitude of Siberia and comparison with Laurentia // J. Geol. 2000. V. 108. № 3. P. 381–401.
- Gorokhov I.M., Semikhatov M.A., Drubetskoy Ye.R., Ivanovskaya T.A., Kutuyavin E.P., Mel'nikov N.N., Turchenko T.L., Tsiপুরский S.I., Yakovleva O.V.* Rb–Sr and K–Ar dating of pelletal and dispersed phyllosilicates of Lower Riphean sedimentary strata of the Anabar Shield // Int. Geol. Rev. 1991. V. 33. № 8. P. 807–821.
- Hall S., Veizer J.* Geochemistry of Precambrian carbonates: VII. Belt Supergroup, Montana and Idaho, USA // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. V. 60. № 4. P. 667–677.
- Jahn B.-M., Cuvellier H.* Pb–Pb and U–Pb geochronology of carbonate rocks: an assessment // Chem. Geol. (Isotope Geoscience Section). 1994. V. 115. № 1/2. P. 125–151.
- Jahn B.-M., Bertrand-Sarfati J., Morin N., Mace J.* Direct dating of stromatolitic carbonates from the Schmidtsdrif Formation (Transvaal Dolomite), South Africa, with implications on the age of the Ventersdorp Supergroup // Geology. 1990. V. 18. № 12. P. 1211–1214.
- Kaufman A.J., Knoll A.H.* Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications // Precambrian Res. 1995. V. 73. № 1/4. P. 27–49.
- Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopiev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshev S., Molchanov A., Kullerud K., Toro J., Miller E., Veselovskiy R., Lia A., Chipley D.* Proterozoic supercontinental restorations: constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton // Precambrian Res. 2015. V. 259. P. 78–94.
- Knoll A.H., Kaufman A.J., Semikhatov M.A.* The carbon-isotopic composition of Proterozoic carbonates: Riphean succession from Northwestern Siberia (Anabar massif, Turukhansk uplift) // Am. J. Sci. 1995. V. 295. № 6. P. 823–850.
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Letnikova E.F., Kaurova O.K., Konstantinova G.V.* Age constraints on the Neoproterozoic Baikal Group from combined Sr isotopes and Pb–Pb dating of carbonates from the Baikal type section, southeastern Siberia // J. Asian Earth Sci. 2013. V. 62. P. 51–66.
- Ludwig K.R.* Users Manual for Isoplot/Ex, Version 2. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Spec. Publ. 1999. № 1a. 47 p.
- Ludwig K.R.* User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Spec. Publ. 2003. V. 4. 72 p.
- Manhes G., Minster J.E., Allegre C.J.* Comparative uranium-thorium-lead and rubidium-strontium study of Severin amphoterite: consequences for Early Solar System chronology // Earth Planet. Sci. Lett. 1978. V. 39. № 1. P. 14–24.
- Moorbath S., Taylor P.N., Orpen J.L., Treloar P., Wilson J.F.* First direct radiometric dating of Archaean stromatolitic limestone // Nature. 1987. V. 326. № 6116. P. 865–867.
- Rainbird R.H., Stern R.A., Khudoley A.K., Kropachev A.P., Heaman L.M., Sukhorukov V.I.* U–Pb geochronology of Riphean sandstone and gabbro from southeast Siberia and its bearing on the Laurentia–Siberia connection // Earth Planet. Sci. Lett. 1998. V. 164. № 3–4. P. 409–420.
- Rasmussen B., Bose P.K., Sarkar S., Banerjee S., Fletcher I.R., McNaughton N.J.* 1.6 Ga U–Pb zircon ages for the Chorhat Sandstone, Lower Vindhyan, India: possible implications for early evolution of animals // Geology. 2002. V. 30. № 2. P. 103–106.
- Ray J.S., Martin M.W., Veizer J., Bowring S.A.* U–Pb zircon dating and Sr isotope systematics of the Vindhyan Supergroup, India // Geology. 2002. V. 30. № 2. P. 131–134.
- Ray J.S., Veizer J., Davis W.J.* C, O, Sr and Pb isotope systematics of carbonate sequences of the Vindhyan Supergroup, India: age, diagenesis, correlations and implications for global events // Precambrian Res. 2003. V. 121. № 1/2. P. 103–140.
- Romero J.A.S., Lafon J.M., Nogueira A.C.R., Soares J.L.* Sr isotope geochemistry and Pb–Pb geochronology of the Neoproterozoic cap carbonates, Tangará da Serra, Brazil // Int. Geol. Rev. 2013. V. 55. № 2. P. 185–203.
- Ross G.M., Villeneuve M.* Provenance of the Mesoproterozoic (1.45 Ga) Belt basin (western North America): another piece in the pre-Rodinia paleogeographic puzzle // Geol. Soc. Am. Bull. 2003. V. 115. № 10. P. 1191–1217.
- Russell J., Chadwick B., Krishna Rao B., Vasudev V.N.* Whole-rock Pb/Pb ages of late-Archaean limestones, Karnataka, India // Precambrian Res. 1996. V. 78. № 4. P. 261–272.
- Sarangi S., Gopalan K., Kumar S.* Pb–Pb age of earliest megascopic, eukaryotic alga bearing Rohtas Formation, Vindhyan Supergroup, India: implications for Precambrian atmospheric oxygen evolution // Precambrian Res. 2004. V. 132. № 1/2. P. 107–121.
- Sears J.W., Chamberlain K.R., Buckley S.N.* Structural and U–Pb geochronological evidence for 1.47 Ga rifting in the Belt basin, western Montana // Can. J. Earth Sci. 1998. V. 35. № 4. P. 467–475.
- Sergeev V.N.* The distribution of microfossils assemblages in Proterozoic rocks // Precambrian Res. 2009. V. 173. № 1. P. 212–222.

*Sergeev V.N., Knoll A.H., Grotzinger J.P.* Paleobiology of the Mesoproterozoic Billiak Group, Anabar uplift, Northern Siberia // *Paleontol. Soc. Mem.* 1995. V. 39. 37 p.

*Smith P.E., Brand U., Farquhar R.M.* U–Pb systematics and alteration trends of Pennsylvanian-aged aragonite and calcite // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1994. V. 58. № 1. P. 313–322.

*Veizer J., Hoefs J.* The nature of  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  secular trends in sedimentary carbonate rocks // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1976. V. 40. № 11. P. 1387–1395.

*Vorob'eva N.G., Sergeev V.N., Petrov P.Yu.* Kotuikan Formation assemblage: a diverse organic-walled microbiota in the Mesoproterozoic Anabar succession, northern Siberia // *Precambrian Res.* 2015. V. 256. № 1. P. 201–222.

*Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Konstantinov K.M., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M.* Geochronology and paleomagnetism of mafic igneous rocks in the Olenek Uplift, northern Siberia: implications for Mesoproterozoic supercontinents and paleogeography // *Precambrian Res.* 2009. V. 170. № 3/4. P. 256–266.

*Рецензент А.Б. Котов*

## EARLY RIPHEAN BILLYAKH GROUP, ANABAR UPLIFT, NORTHERN SIBERIA: ISOTOPE C–O GEOCHEMISTRY AND Pb–Pb AGE OF DOLOSTONES

I. M. Gorokhov<sup>1</sup>, A. B. Kuznetsov<sup>1</sup>, **M. A. Semikhatov**<sup>2</sup>, I. M. Vasil'eva<sup>1</sup>, N. G. Rizvanova<sup>1</sup>, G. V. Lipenkov<sup>3</sup>, E. O. Dubinina<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences St. Petersburg, 199034 Russia*

<sup>2</sup>*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

<sup>3</sup>*A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, 199106 Russia*

<sup>4</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

U and Pb contents and C, O and Pb isotope composition have been determined in dolostones of the Billyakh Group (in 6 samples of the Kotuikan Formation and 15 samples of the Yusmastakh formation) which comprises the upper part of the Riphean section of the Anabar Uplift. The  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values in the Billyakh dolostones vary respectively from  $-3.0$  to  $+0.8\%$  PDB and from  $23.7$  to  $27.3\%$  SMOW and conform with those in carbonate deposits precipitated 1600–1400 m.y. ago. In the  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram, 18 data points of all the dolostone samples of the Kotuikan and Yusmastakh formations are arranged along the straight line which corresponds to the age of  $1513 \pm 35$  Ma. This age for the first time provides immediate geochronological description of the sedimentary rocks from the cover of the Anabar Uplift. Coupled with previously published Rb–Sr glauconite age of the subjacent Ust'-Il'ya formation, this date allows to place all the sedimentary succession of the Billyakh Group into the Early Riphean. These results are indicative of the relatively fast (within  $\sim 10$  m.y.) accumulation of terrigenous-carbonate deposits of the Billyakh Group preceding injection of dolerites of the Kotui Complex and emplacement of Mesoproterozoic Kuonamka Igneous Province on Siberian Craton. The new data put a full stop in discussions about age position of the Riphean deposits exposed on the Anabar Uplift.

*Keywords:* the Riphean, Siberian Platform, dolostone, U–Pb geochronology.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-592X27519-35>