

# **Sr-изотопная хемотратиграфия и Pb-Pb возраст карбонатных отложений рифея Хараулахского поднятия (северо-восточная окраина Сибирской платформы)**

Кочнев Б. Б., Кузнецов А. Б., Ситкина Д. Р., Крамчанинов А. Ю.

## **Аннотация**

В разрезе докембрия Хараулахского поднятия наименее измененные известняки уктинской и эсэлахской свит имеют минимальные отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0.70673-0.70715. В свою очередь, вышележащие нэлегерская и сиэтачанская свиты характеризуются минимальными отношениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от 0.70791 до 0.70817. В сочетании с полученными ранее высокими положительными значениями  $\delta^{13}\text{C}$  до +8‰ для всего Хараулахского разреза [Хабаров, Изох, 2014], это позволяет оценить время формирования уктинской и эсэлахской свит в интервале 800-670 млн. лет, а нэлегерской и сиэтачанской свит – около 640-580 млн. лет. Изохронный Pb-Pb возраст наименее измененных известняков эсэлахской свиты, рассчитанный по 8 образцам, составляет  $720 \pm 30$  млн. лет. Эта датировка позволяет относить нижнюю часть Хараулахского разреза в объеме уктинской и эсэлахской свит к верхней части тония Международной стратиграфической шкалы либо к верхнему рифею Общей стратиграфической шкалы России. Присутствие на Хараулахском поднятии достоверно датированных отложений верхнего рифея свидетельствует о более сложном, чем предполагалось ранее, строении докембрийского осадочного чехла арктической окраины Сибирской платформы.

## **Ключевые слова:**

Сибирская платформа, Хараулахское поднятие, неопротерозой, карбонатные осадочные породы, изотопы углерода, изотопы стронция, Pb-Pb геохронология, изотопная хемотратиграфия

SR-ИЗОТОПНАЯ ХЕМОСТРАТИГРАФИЯ И Rb-Rb ВОЗРАСТ КАРБОНАТНЫХ  
ОТЛОЖЕНИЙ РИФЕЯ ХАРАУЛАХСКОГО ПОДНЯТИЯ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ  
ОКРАИНА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)

Б.Б. Кочнев<sup>1,2</sup>, А.Б. Кузнецов<sup>3</sup>, Д.Р. Ситкина<sup>3</sup>, А.Ю. Крамчанинов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга 3, Россия*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул.  
Пирогова, 1, Россия*

<sup>3</sup>*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-  
Петербург, наб. Макарова, 2, Россия*

В разрезе докембрия Хараулахского поднятия наименее измененные известняки уктинской и эсэлахской свит имеют минимальные отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0.70673-0.70715. В свою очередь, вышележащие нэлегерская и сиэтачанская свиты характеризуются минимальными отношениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от 0.70791 до 0.70817. В сочетании с полученными ранее высокими положительными значениями  $\delta^{13}\text{C}$  до +8‰ для всего Хараулахского разреза, это позволяет оценить время формирования уктинской и эсэлахской свит в интервале 800-670 млн. лет, а нэлегерской и сиэтачанской свит – около 640-580 млн. лет. Изохронный Rb-Rb возраст наименее измененных известняков эсэлахской свиты, рассчитанный по 8 образцам, составляет  $720\pm 30$  млн. лет. Эта датировка позволяет относить нижнюю часть Хараулахского разреза в объеме уктинской и эсэлахской свит к верхней части тония Международной стратиграфической шкалы либо к верхнему рифею Общей стратиграфической шкалы России. Присутствие на Хараулахском поднятии достоверно датированных отложений верхнего рифея свидетельствует о более сложном, чем предполагалось ранее, строении докембрийского осадочного чехла арктической окраины Сибирской платформы.

*Сибирская платформа, Хараулахское поднятие, неопротерозой, карбонатные осадочные породы, изотопы углерода, изотопы стронция, Rb-Rb геохронология, изотопная хемотратиграфия*

Рифейские отложения занимают заметное место в строении осадочного чехла северо-восточной окраины Сибирской платформы. Они обнажаются в южной части Оленекского поднятия в междуречье рр. Оленек и Лена, а также на юге Хараулахского поднятия в нижнем течении р. Лена (рис. 1). Кроме того, они частично вскрыты западнее, в нескольких глубоких скважинах Лено-Анабарского прогиба [Граусман и др., 1996], а по геофизическим данным они прослеживаются вдоль всей арктической окраины Сибирской платформы [Конторович и др., 2013].

Представления о возрасте рифейских отложений Оленекского и Хараулахского поднятий и об их корреляции между собой изначально, во второй половине XX века, основывались на анализе вертикального распространения строматолитов и на валовых K-Ar и Rb-Sr датировках. Согласно существовавшим представлениям, долгое время считалось, что на Оленекском поднятии развиты отложения нижнего, среднего и верхнего рифея, а довендская часть Хараулахского разреза (уктинская, эсэлехская, нэлегерская и сизэтанская свиты) имеет позднерифейский возраст и является аналогом верхней части разреза Оленекского поднятия в объеме хайпахской и частично дебенгдинской свит [Шпунт и др., 1979, 1982; Семихатов, Серебряков, 1983; Шенфиль, 1991].

В начале XXI века с совершенствованием методов изотопной геохимии и геохронологии было показано, что возрастной диапазон формирования рифейской части разреза Оленекского и Анабарского поднятий может быть существенно сужен, а для большинства свит удревнен [Ernst et al., 2000; Горохов и др., 2006; 2018; 2019; Wingate et al., 2009; Эрнст и др., 2016; Зайцева и др., 2016, 2017]. Эти данные позволили сделать вывод об отсутствии верхнего рифея на Анабарском и Оленекском поднятиях. Вместе с тем, новые данные по изотопному составу углерода в карбонатных породах рифея Хараулахского разреза и по микрофоссилиям из глубоких скважин Лено-Анабарского прогиба показали, что распространенные здесь толщи, ранее сопоставляемые с Оленекским разрезом рифея, могут иметь более молодой – позднерифейский или ранневендский возраст [Хабаров, Изох, 2014; Nagovitsin et al., 2015]. В этой работе нами приводятся новые изотопно-геохимические и геохронологические данные по разрезу Хараулахского поднятия, позволяющие скорректировать его расчленение и корреляцию, а также уточнить историю формирования позднедевонского осадочного чехла на северо-востоке Сибирской платформы.

## СТРАТИГРАФИЯ

Рифейские и вендские отложения обнажены в южной части Хараулахского поднятия, где в окрестностях пос. Чекуровка по обоим берегам р. Лена расположены стратотипы выделяемых свит. Отложения позднего докембрия общей мощностью свыше 1100 м слагают ядро крупной Чекуровской антиклинали, осложненной более мелкими тектоническими нарушениями, и прорваны серией силлов раннекембрийского возраста (рис. 1, 2). Самые нижние горизонты карбонатных пород рифея, относимые к верхам уктинской свиты и к нижней части эсэлекской свиты обнажены только по правому берегу р. Лена в 2 км ниже устья р. Укта (обнажение К16-014; основание изученного разреза  $70,9744^{\circ}$  с.ш.,  $127,5890^{\circ}$  в.д.), где представлены желтовато-серыми и серыми, в различной степени доломитизированными известняками (рис. 3). Отмечаются разнообразные столбчатые строматолиты, биоламинитовые тонкослоистые породы, пологие куполовидные строматолитовые биогермы, интракластовые и брекчированные карбонатные породы, иногда прослой калькаренинов. Доломиты и известняки, как и строматолитовые постройки и продукты их разрушения, могут замещать друг друга по простираанию. Средняя и верхняя часть эсэлекской свиты, как и вышележащие толщи, лучше обнажена по левому берегу р. Лена в 2 км ниже пос. Чекуровка (обнажение К16-015, основание изученного разреза  $71,0615^{\circ}$  с.ш.,  $127,5001^{\circ}$  в.д.). Здесь она, как и в нижней части, представлена чередованием строматолитовых, биоламинитовых и обломочных доломитов и известняков. Породы в различной степени перекристаллизованы, особенно в доломитизированных разностях. Согласно реконструкциям Е.М. Хабарова, отложения эсэлекской свиты формировались в обстановках протяженного мелкого и среднего шельфа, о чем, кроме широко развитых биогенных построек, свидетельствуют прослой обломочных карбонатов, интерпретируемых как проксимальные штормовые темпеститы и турбидиты [Хабаров, Изох, 2014]. Мощность эсэлекской свиты 320 м.

Нэлегерская свита сложена в нижней части преимущественно доломитами, тогда как в верхней части преобладают известняки. В отличие от подстилающей эсэлекской свиты, в нэлегерской свите отсутствуют морфологически разнообразные строматолиты, за исключением отдельных и часто брекчированных пластово-строматолитовых (биоламинитовых) слоев. В нижней части нэлегерской свиты преобладают светло-серые оолитовые и песчанистые доломиты (доларениты) и разнообразные обломочные (брекчированные, интракластовые) доломиты. Известняки верхней части свиты серые микритовые и зернистые, иногда битуминозные, в различной степени

доломитизированные и частично перекристаллизованные. Подобный набор литологических признаков указывает на гидродинамически активные условия формирования отложений и на их приуроченность к мелководному шельфу. Отложения нэлегерской свиты прорываются серией долеритовых силлов, в приконтактовых частях которых отмечаются зоны ороговикования и деформации. Вместе с тем, в экзоконтактах долеритовых тел встречены как известняки, так и доломиты, что свидетельствует о более раннем, чем внедрение базитов, характере доломитизации. Мощность нэлегерской свиты 160 м.

Сизэачанская свита, за исключением самой верхней части, имеет выраженное ритмичное строение и смешанный карбонатно-терригенный состав. Нижние части ритмов, которых в составе свиты насчитывается более 50, сложены тонкослоистыми алевролитами и аргиллитами серой, зеленовато-серой, а также красно-бурой окраски. Верхние части (от 0,3-0,5 до 1-1,2 м) ритмов слагаются карбонатными породами: в различной степени доломитизированными, часто глинистыми, иногда окремненными биоламинитовыми и интракластовыми известняками желтовато-серой и серой окраски. Кроме тонкой параллельной слоистости встречается волнистая и линзовидная, а также трещины усыхания. Вверх по разрезу мощность ритмов возрастает от 1,5-2 м до 10-15 и более м, в основном за счет увеличения мощности алевро-аргиллитовых пачек. Обстановки осадконакопления сизэачанской свиты с некоторой условностью реконструированы Е.М. Хабаровым как переходные от континентальных к морским: пологие прибрежные кумулятивные равнины, эпизодически затапливаемые морем [Хабаров, Изох, 2014]. В кровле свиты выделяется 15-метровый пласт биоламинитовых окремненных доломитов. Общая мощность сизэачанской свиты около 300 м. Выше залегают грубозернистые песчаники, с которых в этом разрезе принято начинать хараютехскую свиту венда [Шпунт и др., 1982].

По опубликованным ранее данным, возраст рассмотренных выше стратиграфических подразделений достаточно дискуссионен. С одной стороны, описанный в них комплекс строматолитов имеет типичный для отложений верхнего рифея состав и в значительной степени сходен с комплексом лахандинской серии Учуро-Майского региона (юго-восток Сибирской платформы), возраст которой составляет около 1 млрд. лет [Шпунт и др., 1982; Семихатов, Серебряков, 1983; Семихатов и др., 2000]. Обломочные цирконы из песчаников уктинской свиты, лежащих в основании разреза, не содержат зерен с возрастом моложе 1800 млн. лет [Khudoley et al., 2015], что также не противоречит отнесению отложений к рифею. С другой стороны, аномально высокие (до +8‰) значения  $\delta^{13}\text{C}$  из карбонатных пород

Хараулахского разреза рифея дали основание Е.М. Хабарову считать, что возраст этих толщ не превышает 800 млн. лет, причем может быть и ранневендским (640-580 млн. лет) [Хабаров, Изох, 2014].

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При изучении разрезов и отборе образцов в полевых условиях на основе реакции с соляной кислотой визуально выбирались наименее доломитизированные и наиболее чистые от некарбонатных примесей разности, изотопные характеристики которых, как ожидалось, приближены к первичным в воде палеобассейна. В зависимости от обнаженности и состава пород, интервал отбора образцов составлял от 2 до 10-15 м. В дальнейшем из коллекции образцов были визуально выбраны содержащие наименьшее количество силикатной примеси, из которых высверливанием порции порошка из наименее измененных участков распиленного образца отобран материал для геохимических и изотопных исследований. Геохимически изучено 35 образцов карбонатных пород, из которых изотопный состав стронция определен в 24 образцах (табл. 1). Кроме того, для обсуждения и сравнительного анализа нами использованы данные по химическому составу и по изотопному составу углерода из карбонатных пород Хараулахского разреза, опубликованные Shane M. Pelechaty с соавторами [1996] и Е.М. Хабаровым и О.П. Изох [2014] (рис. 3).

Определение содержания Ca, Mg, Fe, Mn и Sr в образцах карбонатных пород проведено в Ресурсном центре методов анализа состава вещества (МАСВ СПбГУ, Санкт-Петербург). Образцы (100-150 мг) растворялись в 1N растворе HCl при слабом нагревании. Измерение концентраций элементов в растворе проведено на атомно-эмиссионном спектрометре ICPE-9000. Изучение Rb-Sr систематики карбонатных пород проведено с использованием ступенчатого растворения, включавшего предварительную обработку навески образца (около 100 мг) 0.01N раствором HCl при комнатной температуре и последующее растворение в 1N соляной кислоте [Кузнецов и др., 2005, 2008]. Содержания Rb и Sr в обогащенной карбонатной фракции определено масс-спектрометрическим методом изотопного разбавления с применением смешанного индикатора  $^{87}\text{Rb}+^{84}\text{Sr}$ . Изотопный состав Sr измерялся на многоколлекторном масс-спектрометре Triton II. Средние значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в стандартных образцах NIST SRM 987 и EN-1 составляли в период работы соответственно  $0.710289 \pm 0.000005$  ( $2s_{\text{средн.}}$ ,  $n=28$ ) и  $0.709213 \pm 0.000008$  ( $2s_{\text{средн.}}$ ,  $n=7$ ). Поправка на возраст измеренного отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в большинстве образцов была менее 0.00001, из-за высокой концентрации Sr и

очень низкого содержания Rb (менее 0.11 мкг/г). Только в трех образцах уктинской и трех образцах эсэлекской свиты эта поправка составила 0.00002.

При изучении U–Pb систематики известняков проводилась предварительная химическая обработка образцов в 0.03N HCl, что позволило удалить до 1–2% поверхностных загрязнений и вторичных карбонатных генераций. Далее образцы растворялись в 1N HCl при комнатной температуре. Раствор каждой фракции делился на две аликвоты: одна для определения изотопного состава Pb, другая для определения содержания U и Pb с добавлением смешанного индикатора  $^{235}\text{U} + ^{208}\text{Pb}$  [Овчинникова и др., 2007; 2012]. Изотопный состав Pb и содержания U и Pb измеряли на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI с Re-лентами. Параметры изохрон вычислялись с использованием программы ISOPLOT [Ludwig, 2003]. Погрешности, использованные при вычислении возраста, определялись с учетом измерения серии соответствующих образцов и стандарта NIST SRM 981. Средние погрешности воспроизводимости отношений  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  составляли 0.09% и 0.11% соответственно.

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

**Уктинская и эсэлекская свиты.** Изученные карбонатные породы уктинской и нижней части эсэлекской свит (разрез K16-014, 12 образцов) представлены известняками и доломитистыми известняками, в одном случае до известковистых доломитов ( $\text{Mg}/\text{Ca}=0.01\dots0.46$ ). Содержание алюмосиликатной примеси для этого интервала разреза составляет от 12.3 до 22.1% (табл. 1, рис. 3). Содержания Mn в растворимой части породы от 11 до 330 мкг/г, железа от 227 до 1920 мкг/г, стронция от 85 до 188 мкг/г. По соотношениям Fe/Sr и Mn/Sr из этого интервала наиболее пригодны 6 образцов известняков, относимые к самой нижней части эсэлекской свиты (обр. K16-144 – K16-149). Верхняя часть эсэлекской свиты, отобранная в разрезе K16-015 (11 образцов), в имеющейся коллекции представлена известняками ( $\text{Mg}/\text{Ca} < 0.01$ ). Содержание алюмосиликатной примеси составляет от 1.1 до 18.3%, наиболее чистые известняки приурочены к верхней части свиты. В этой части разреза в растворимой фракции карбонатной породы содержание Mn от 7 до 28 мкг/г, железа от 50 до 895 мкг/г, стронция от 120 до 1550 мкг/г.

Отношения Fe/Sr и Mn/Sr в известняках уктинской свиты варьируют в пределах 3.3-14.4 и 1.6-14.9 (табл. 1). Эти отношения в известняках эсэлекской свиты значительно ниже: Fe/Sr = 0.1...12.2 и Mn/Sr = 0.01...0.25. Таким образом, 17 образцов

чистых известняков эселехской свиты полностью удовлетворяют геохимическим критериям сохранности Rb-Sr изотопных систем и пригодны для целей Sr-изотопной хемотратиграфии ( $Fe/Sr < 5$  и  $Mn/Sr < 0.2$ ) [Кузнецов и др., 2014, 2018]. Остальные два образца известковистых доломитов из нижней части эселехской свиты и все образцы из уктинской свиты не вполне пригодны для этой цели.

Отношения  $^{87}Sr/^{86}Sr$  в 13 образцах известняков эселехской свиты лежат в интервале 0.70673-0.70715 (табл. 1), и лишь в одном образце известковистого доломита K16-151 ( $Mg/Ca = 0.46$ ) увеличиваются до 0.70789. Отношения  $^{87}Sr/^{86}Sr$  в 3 изученных образцах уктинской свиты заключены в пределах 0.70703-0.70728. Характерно, что отношение  $^{87}Sr/^{86}Sr$  для известняков уктинской и эселехской свит растет по мере уменьшения концентрации стронция (рис. 3в), что может отражать изменение изотопного состава стронция и его некоторую потерю при постседиментационных изменениях.

**Нэлегерская и сиэтачанская свиты.** Изученные 12 образцов представлены известняками и в меньшей степени слабо доломитистыми известняками ( $Mg/Ca = 0.01...0.14$ ), в одном образце известковистым доломитом ( $Mg/Ca = 0.35$ ). Содержание нерастворимой примеси в карбонатной породе составляет от 1 до 16%, однако для 9 образцов оно не превышает 6% (табл. 1). Растворимая фракция содержит Mn от 11 до 2950 мкг/г, Fe от 105 до 3960 мкг/г, Sr от 250 до 997 мкг/г. В этом интервале разреза формальным критериям сохранности Rb-Sr изотопных систем удовлетворяют лишь два образца из нэлегерской свиты. Остальные пять образцов из сиэтачанской свиты могут быть ограниченно пригодны из-за высокой концентрации марганца ( $Mn/Sr = 0.31...2.74$ ) при относительно небольшом отношении  $Fe/Sr$ , лежащем в интервале 0.5-1.9. Отношение  $^{87}Sr/^{86}Sr$  в двух образцах нэлегерской свиты практически одинаково - 0.70791-0.70792, а пяти известняках сиэтачанской свиты лежат в интервале от 0.70800 до 0.70817. Эти значения существенно выше, чем отношение  $^{87}Sr/^{86}Sr$  в подстилающих эселехской и уктинской свитах (табл. 1). Вариации отношения  $^{87}Sr/^{86}Sr$  в изученных образцах нэлегерской и сиэтачанской свит, в отличие от подстилающих отложений, не связаны с изменением концентрации стронция (рис. 3в), что может указывать на меньшую степень постседиментационных изменений.

Сравнение геохимических характеристик карбонатных пород в нашей выборке (табл. 1) с полученными ранее [Хабаров, Изох, 2014] показывает их большое сходство. Для оценки степени постдиагенетических изменений важен тот факт, что карбонатные породы в непосредственном экзоконтакте мощного силла долеритов, прорывающего среднюю часть нэлегерской свиты, представлены серо-зелеными офитизированными



известняками (обр. К16-188), но имеют значение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  равное 0.70792 (табл. 1). Это значение не отличается от Sr-изотопной характеристики известняков в удаленных от интрузий участках разреза. Анализ изотопного состава кислорода, а также оценка степени перекристаллизации в шлифах, проведенная нашими коллегами ранее [Хабаров, Изох, 2014] позволяют утверждать, что карбонатные породы Хараулахского разреза в ряде интервалов разреза сохранили первичные C- и Sr-изотопные характеристики и пригодны для хеостратиграфических построений.

## РЬ–РЬ ВОЗРАСТ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ЭСЭЛЕХСКОЙ СВИТЫ

Изучение U–Pb систематики известняков проведено в восьми наименее измененных образцах из эсэлахской свиты. Выбранные образцы удовлетворяют строгим геохимическим критериям ( $\text{Mn}/\text{Sr} < 0.2$ ,  $\text{Fe}/\text{Sr} < 3$ ), указывающим на отсутствие значимых нарушений изотопной системы известняков и на их пригодность для изотопно-геохронологических исследований [Кузнецов и др., 2005, 2008]. Измеренные отношения  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в известняках эсэлахской свиты варьируют от 20.336 до 38.979 и от 15.644 до 16.828, соответственно (табл. 2). Отношение  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в известняках заключено в узких пределах 38.846–41.483, что согласуется с этим отношением в докембрийских осадочных карбонатных породах и указывает на отсутствие привноса эпигенетического торогенного свинца [Овчинникова и др., 2007, 2012; Семихатов и др., 2003; Kuznetsov et al., 2013, 2017]. Рассчитанное значение возраста для известняков эсэлахской свиты равно  $720 \pm 30$  млн лет при низкой величине СКВО=1.9 (рис. 4).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Новые данные по изотопному составу стронция, полученные для разреза Хараулахского поднятия, полностью согласуются с предыдущими оценками возраста в интервале 820–580 млн. лет по изотопам углерода [Хабаров, Изох, 2014]. Однако они лишь отчасти подтверждают вывод об отнесении рассматриваемых отложений к нижнему венду. Отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в наименее измененных известняках эсэлахской свиты составляют 0.70673–0.70715. Подобные значения в карбонатных осадочных породах не характерны для венда и эдиакария, но широко распространены в возрастном интервале 800–670 млн. лет, т.е. в позднем тонии-криогении [Кузнецов и др., 2014; Kuznestov et al., 2017], и лишь в виде исключения обнаружены в основании эдиакария Дзабханского террейна западной Монголии [Овчинникова и др., 2012]. При этом,

вмещающие отложения, датированные Pb-Pb методом  $632 \pm 14$  млн. лет в этом разрезе, в пределах ошибки могут соответствовать и верхам криогения, о чем свидетельствуют результаты Re-Os датирования из этого же уровня  $659 \pm 4.5$  млн. лет [Rooney et al., 2015]. В пользу отнесения нижней части осадочной последовательности в объеме уктинской и эсэлекской свит к среднему неопротерозою свидетельствуют данные C-изотопной хемотратиграфии [Хабаров, Изох, 2014]. Полученные для этих свит значения  $\delta^{13}\text{C}$ , достигающие  $+7.1 \dots +7.6\%$  характерны для отложений не древнее 830 млн. лет [Подковыров и др., 1998; Walter et al., 2000; Halverson et al., 2010]. Согласно этим вариантам сводных кривых эволюции изотопного состава углерода, возраст уктинской и эсэлекской свит может быть оценен в интервалах 800-715 или 700-670 млн. лет. Первый вариант в большей степени согласуется с полученным нами Pb-Pb возрастом  $720 \pm 30$  млн лет. Таким образом, возраст карбонатных осадков эсэлекской свиты можно считать позднерифейским [Семихатов и др., 2015], а в Международной хроностратиграфической шкале он отвечает терминальным горизонтам тония [International..., 2018].

Поскольку карбонаты подстилающей уктинской свиты принципиально не отличаются ни по условиям образования, ни по Sr-изотопной характеристике от эсэлекских, границу уктинской и эсэлекской свит в Хараулахском разрезе целесообразнее было бы опустить до кровли подстилающих песчаников (рис. 2).

В свою очередь, сочетание изотопных характеристик карбонатных пород для нэлегерской и сиэтачанской свит ( $\delta^{13}\text{C}$  до  $+8.5 \dots +8.6\%$ ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{мин}} \geq 0.7079$ ) действительно может указывать на их ранневендский возраст и на наличие крупного перерыва в основании нэлегерской свиты, как это было предложено Е.М. Хабаровым и О.П. Изох [2014]. В пользу этого косвенно указывает большая степень зависимости отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от содержания Sr для известняков уктинской и эсэлекской свит, возможно указывающая на влияние метеорных вод во время преднэлегерского перерыва. Близкие к полученным для нэлегерской и сиэтачанской свитам C-изотопные значения наблюдаются в нижней части юдомской серии (яланская и малская свиты) Юдомо-Майского прогиба, которые относятся к нижнему венду на юго-востоке Сибирской платформы [Семихатов и др., 2004]. Наиболее географически близким регионом, где по изотопно-геохимическим данным выделяются аналоги нижнего венда, являются центральные районы Сибирской платформы. Здесь к этому уровню отнесены ынахская и бесюряхская свиты нижней части непского горизонта ( $\delta^{13}\text{C}$  до  $+5.5\%$ ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{мин}} = 0.7079$ ) [Кочнев и др., 2018]. Полученные для нэлегерской и сиэтачанской свит изотопные характеристики отчасти близки к таковым для доломитов верхней части

маастахской свиты Оленекского поднятия ( $\delta^{13}\text{C} = 3.6\dots 6.5\text{‰}$ ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.7082$ ) [Knoll et al., 1995; Pelechaty et al., 1996], максимальный возраст верхней части которой ограничен 600 млн. лет по детритовым цирконам [Vishnevskaya et al., 2017]. Однако разница в мощности, составе и, по большей части, в условиях седиментации делают непосредственную корреляцию этих подразделений затруднительной. В отличие от подстилающих отложений, сопоставление хараутехской свиты Хараулахского поднятия с хатыспытской и туркутской свитами верхнего венда в бассейне р. Хорбусуонки, принимается всеми исследователями [Шпунт и др., 1979; Хоментовский, 1985; Knoll et al., 1995; Pelechaty et al., 1996].

Полученные возрастные оценки для Хараулахского разреза позволяют исключить предполагаемую ранее [Шпунт и др., 1979; Семихатов, Серебряков, 1983] корреляцию с разрезом рифея Оленекского поднятия. Основным аргументом в пользу ранне-среднерифейского возраста развитой здесь солоолийской серии, наряду с U-Pb возрастом  $1473 \pm 24$  млн. лет из прорывающего ее нижнюю часть силла [Wingate et al., 2009], являются K-Ar и Rb-Sr возрасты раннего диагенеза глауконитов из арымасской, дебенгдинской и хайпахской свит. Они дают последовательно уменьшающийся снизу вверх ряд значений от  $1305 \pm 8$  до  $1172 \pm 18$  (Rb-Sr) и от 1302 до  $1112 \pm 24$  (K-Ar) млн. лет [Зайцева и др., 2017]. Представительные C- и Sr-изотопные данные для оленекского разреза рифея пока отсутствуют, однако имеющиеся немногочисленные определения из дебенгдинской и хайпахской свит согласуются с их принадлежностью к среднему рифею и принципиально отличны от таковых в Хараулахском разрезе. Из известняков второй подсвиты дебенгдинской свиты известны три определения  $\delta^{13}\text{C}$ , лежащие в интервале  $0.0\dots -1.3\text{‰}$  V-PDB [Ивановская и др., 2014]. Значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в известняках из этого же уровня и из средней части хайпахской свиты составляют  $0.70490\dots 0.70493$  [Зайцева и др., 2017].

На северо-востоке Сибирской платформы отложения нижней части неопротерозоя (тония) Международной шкалы, или верхнего рифея Общей стратиграфической шкалы России выделяются также в Лено-Анабарском прогибе. Здесь в скважинах Бурская-341-0 и Хастахская-930, расположенных к западу от Оленекского поднятия, развитые ниже основания венда толщи мощностью свыше 1300 м содержат микрофоссилии, характерные для тония (1000-720 млн. лет) Международной шкалы [Nagovitsin et al., 2015]. Наличие неопротерозойских (верхнерифейских) отложений на основе данных по обломочным цирконам предполагается также на восточном склоне Анабарского поднятия [Купцова и др., 2015],

Обстановки протяженного карбонатного шельфа, интерпретируемые для Хараулахского разреза рифея, наряду с отсутствием в песчаниках уктинской свиты обломочных цирконов моложе 1.8 млрд. лет [Khudoley et al., 2015] позволяют сделать вывод, что в течение мезо- и неопротерозоя и вплоть до позднего венда на северо-восточной (в современных координатах) окраине Сибирского кратона осадконакопление проходило в тектонически спокойной обстановке. Здесь, начиная с конца раннего рифея (Уджинский палеорифт, [Malyshev et al., 2018]), не отмечено признаков рифтогенеза, который, например, реконструируется на рубеже мезо- и неопротерозоя на юго-восточной окраине Сибирской платформы [Khudoley et al., 2001]. Рассматриваемая область также не подвергалась влиянию интенсивных коллизионных процессов, широко проявленных на современной северо-западной, западной и юго-западной окраинах Сибирской платформы в неопротерозое [Верниковский и др., 2009].

В отличие от северо-востока, для большей части Сибирской платформы характерно отсутствие осадконакопления в возрастном интервале с начала позднего рифея до раннего, а чаще до начала-середины позднего венда. В северных районах платформы этот крупнейший в позднем докембрии перерыв, отвечающий большей части мезопротерозоя (1400-1000 млн. лет), тонию (1000-720 млн. лет) и криогению (720-635 млн. лет) Международной шкалы проявлен на Анабарском поднятии, что обнаружено при прямом датировании как осадочных пород рифейского чехла – глауконитов [Зайцева и др., 2016] и карбонатов [Горохов и др., 2018, 2019], так и прорывающих его даек на восточном и северном склонах поднятия [Ernst et al., 2000; Эрнст и др., 2016]. В Уджинском палеопрогриве, расположенном между Оленекским и Анабарским поднятиями, также имеется перерыв [Гладкочуб и др., 2009; Malyshev et al., 2018], во время которого были размыты не только верхнерифейские, но и более древние толщи, поскольку в этих районах венд подстилается отложениями нижнего рифея [Ernst et al., 2000; Malyshev et al., 2018]. Крупный перерыв в седиментации характерен и для юго-востока платформы: между уйской серией низов верхнего рифея либо еще более древними образованиями и юдомской серией венда [Семихатов и др., 2004; 2015; Khudoley et al., 2015]. В восточной части внутренних районов Сибирской платформы рифейские отложения полностью отсутствуют либо представлены локально развитыми гляциогенными толщами с возрастом не древнее 700 млн. лет [Кочнев и др., 2015; 2018]. На западе Сибирской платформы рифейские отложения по большей части сложены нижним-средним рифеем [Краевский и др., 2018], тогда как верхнерифейские осадочные и вулканогенно-осадочные толщи приурочены в основном к окраинным частям платформы [Верниковский и др., 2009].

Присутствие к северо-западу и к востоку от Оленекского поднятия мощных, не менее 1-1,5 км, осадочных толщ верхнего рифея позволяет предполагать, что они были развиты и на самом Оленекском поднятии, однако были здесь эродированы во время длительного предвендского перерыва (рис. 5). В составе разрезов верхнего рифея имеются как потенциально нефтематеринские тонкотерригенные толщи (Лено-Анабарский прогиб), так и органогенные карбонатные постройки (Хараулахское поднятие), которые могли служить ловушками природных углеводородов. Интерпретируемые по сейсмическим данным глубины залегания рифейских толщ в пределах северо-восточной окраины Сибирской платформы часто превышают таковые для главной зоны нефтеобразования [Конторович и др., 2013]. Несмотря на это, наши выводы важны для более корректной интерпретации геофизических данных и для оценки углеводородного потенциала осадочного чехла всей арктической окраины Сибирской платформы, которая в последние годы рассматривается как перспективный объект для прогнозирования и поиска месторождений нефти и газа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые изотопно-геохимические и геохронологические данные по отложениям докембрия Хараулахского поднятия северо-востока Сибирской платформы позволяют сделать несколько важных выводов, касающихся стратиграфии и истории развития осадочных бассейнов. Наряду с высокими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  до +8.5‰ [Хабаров, Изох, 2014], известняки уктинской и эсэлекской свит имеют минимальные значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70673\dots 0.70715$ , тогда в вышележащих нэлегерской и сизтачанской свитах эти значения возрастают до 0.70791...0.70817. С учетом C-изотопных данных, наиболее вероятно, что нижняя часть разреза может иметь возраст в интервале 800-670 млн. лет, а верхняя, скорее всего относится к нижнему венду (640-580 млн. лет). Наличие крупного перерыва в осадконакоплении в средней части Хараулахского разреза между эсэлекской и нэлегерской свитами подтверждается и седиментологическими наблюдениями.

Осуществлено первое прямое изохронное Pb-Pb датирование известняков эсэлекской свиты, возраст которых составил  $720 \pm 30$  млн. лет. Это значение полностью согласуется с результатами углеродной и стронциевой изотопной хемотратиграфии. Среднепротерозойский (или позднерифейский) возраст нижней части разреза Хараулахского поднятия делает невозможной предлагаемую ранее корреляцию с разрезом Оленекского поднятия, который по K-Ar и Rb-Sr возрастам датируется

поздним мезопротерозоем, а также имеет принципиально иные изотопно-геохимические характеристики карбонатных осадочных пород [Ивановская и др., 2014; Зайцева и др., 2017].

Разный стратиграфический объем рифея в различных районах северо-востока Сибирской платформы (Оленекское и Хараулахское поднятия, Лено-Анабарский прогиб) свидетельствует о более сложном строении и многоэтапном формировании докембрийского осадочного чехла, чем это представлялось ранее. Несмотря на перерывы в осадконакоплении, существовавший здесь в течение мезо- и неопротерозоя окраинно-эпиконтинентальный осадочный бассейн мог генерировать значительные объемы органического вещества, что следует учитывать при дальнейшем прогнозировании ресурсов углеводородного сырья.

Геохимическое изучение пород и исследование изотопного состава стронция выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00418. Геохронологические исследования проведены при содействии проекта РНФ № 18-17-00247. Окончательная подготовка рукописи осуществлена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-70110. Химический анализ карбонатных пород проведен с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка МАСВ СПбГУ. Авторы глубоко признательны В.Э. Павлову (ИФЗ РАН) за предоставленную возможность участия в полевых исследованиях на Хараулахском поднятии в 2016 г., а также благодарят рецензентов Б.Г. Покровского (ГИН РАН) и А.К. Худолея (СПбГУ) за конструктивные замечания, позволившие улучшить первоначальный вариант статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Матушкин Н.Ю., Метелкин Д.В., Советов Ю.К.** Геодинамическая эволюция складчатого обрамления и западная граница Сибирского кратона в неопротерозое: геолого-структурные, седиментологические, геохронологические и палеомагнитные данные // Геология и геофизика, 2009, т. 50, № 4, с. 502-519.

**Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Травин А.В., Мазукабзов А.М., Константинов К.М., Юдин Д.С., Корнилова Т.А.** Уджинский мезопротерозойский палеорифт (север Сибирского кратона): новые данные о возрасте базитов, стратиграфии и микрофитологии // Доклады РАН, 2009, т. 425, № 5, с. 642-648.

**Горохов И.М., Семихатов М.А., Аракелянц М.М., Фаллик Е.А., Мельников Н.Н., Турченко Т.Л., Ивановская Т.А., Зайцева Т.С., Кутявин Е.П.** Rb-Sr, K-Ar, H- и

О-изотопная систематика среднерифейских аргиллитов дебенгдинской свиты Оленекского поднятия (северная Сибирь) // Стратиграфия. Геол. корреляция, 2006, т. 14, № 3, с. 41-56.

**Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Константинова Г.В., Липенков Г.В., Дубинина Е.О., Бигун И.В.** Карбонатные породы пограничных рифей-вендских отложений Анабарского поднятия: изотопная ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) систематика и хемотратиграфические следствия // Доклады РАН, 2018, т. 482, № 4, с. 434-438.

**Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Васильева И.М., Ризванова Н.Г., Липенков Г.В., Дубинина Е.О.** Раннерифейская билляхская серия Анабарского поднятия (Северная Сибирь): изотопная С-О геохимия и Pb-Pb возраст доломитов // Стратиграфия. Геол. корреляция, 2019, т. 27, № 5, с. 19-35.

**Граусман В.С., Рудавская В.А., Васильева Н.И.** Стратиграфия верхнего докембрия и нижнего кембрия Оленекского поднятия // Отечественная геология, 1996, № 8, с. 30-35.

**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.

**Ивановская Т.А., Гептнер А.Р., Савичев А.Т., Покровский Б.Г., Покровская Е.В.** Микроконкреции сидерита в глауконитсодержащих глинисто-алевритовых породах хайпахской свиты (средний рифей, Оленекское поднятие) // Литология и полезные ископаемые, 2014, № 6, с. 554-582.

**Конторович В.А., Конторович А.Э., Губин И.А., Зотеев А.М., Лапковский В.В., Малышев Н.А., Соловьев М.В., Фрадкин Г.С.** Структурно-тектоническая характеристика и модель геологического строения неопротерозойско-фанерозойских отложений Анабаро-Ленской зоны // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 8, с. 1253-1274.

**Кочнев Б.Б., Покровский Б.Г., Прошенкин А.И.** Верхнепротерозойский гляциокомплекс центральных областей Сибирской платформы // Доклады РАН, 2015, т. 464, № 4, с. 448-451.

**Кочнев Б.Б., Покровский Б.Г., Кузнецов А.Б., Марусин В.В.** C- и Sr-хемостратиграфия карбонатных отложений венда-нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2018, т. 59, № 6, с. 731-755.

**Краевский Б.Г., Якшин М.С., Наговицин К.Е.** Региональная стратиграфическая схема рифейских отложений западной части Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2018, №7, с. 4-14.

**Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Крупенин М.Т., 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 полезные ископаемые, 2005, № 3, С. 227-249.

**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 хемостратиграфии в решении проблем стратиграфии верхнего протерозоя (рифея и венда) // Стратиграфия. Геол. корреляция, 2014, т. 22, № 6, с. 3-25.

**Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М.** Стронциевая изотопная хемостратиграфия: основы метода и его современное состояние // Стратиграфия. Геол. корреляция, 2018, т. 26, № 4, с. 3-23.

**Купцова А.В., Худoley А.К., Дэвис В., Рейнбирд Р.Х., Молчанов А.В.** Результаты U-Pb датирования обломочных цирконов из верхнепротерозойских отложений восточного склона Анабарского поднятия // Стратиграфия. Геол. корреляция, 2015, т. 23, № 3, с. 13-29.

**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 надтиллитовых известняков неопротерозойской цаганоломской свиты, бассейн р. Дзабхан, западная Монголия // Стратиграфия. Геол. корреляция, 2012, т. 20, № 6, с. 28-40.



**Семихатов М.А., Серебряков С.Н.** Сибирский гипостратотип рифея. М., Наука, 1983, 224 с.

**Семихатов М.А., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Гороховский Б.М., Подковыров В.Н.** Изотопный возраст границы среденго и верхнего рифея: Pb-Pb геохронология карбонатных пород лахандинской серии, восточная Сибирь // Доклады РАН, 2000, т. 372, № 2, с. 216-221.

**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. 3-28.

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

**Хабаров Е.М., Изох О.П.** Седиментология и изотопная геохимия рифейских карбонатных отложений Хараулахского поднятия севера Восточной Сибири // Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 5-6, с. 797-820.

**Хоментовский В.В.** Венд Сибирской платформы / Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы. М., Наука, 1985, с. 83-161.

**Шенфиль В.Ю.** Поздний докембрий Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 1991. 185 с.

**Шпунт Б.Р., Шаповалова И.Г., Шамшина Э.А., Лабезник К.А., Саввинов В.Т., Пермяков Э.Д., Келле Э.Я., Янковский Е.В.** Протерозой северо-восточной окраины Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 1979, 215 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., Сёдерлунд 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.

**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 // *Journal of Geology*, 2000, v. 108, p. 381–401

**International** Chronostratigraphic Chart 2018.  
<http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>

**Halverson G.P., Wade B.P., Hirtgen M.T., Barovich K.M.** Neoproterozoic chemostratigraphy // *Precambrian Res.*, 2010, v. 182, p. 337-350.

**Khudoley A.K., Rainbird R.H., Stern R.A., Kropachev A.P., Heaman I.M., Zanin A.M., Podkovyrov V.N., Belova V.N., Sukhorukov V.I.** Sedimentary evolution of the Riphean-Vendian basin of southeastern Siberia // *Precambrian Res.*, 2001, v. 111, p. 129-163.

**Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopiev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshev S., Molchanov A., Kullerud K., Toro J., Miller E., Veselovsky R., Li A., Chipley D.** Proterozoic supercontinental restoration: Constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton // *Precambrian Res.*, 2015, v. 259, p. 78-94.

**Knoll A.H., Grotzinger J.P., Kaufman A.J., Kolosov P.** Integrated approaches to terminal Proterozoic stratigraphy: an example from the Olenek Uplift, northeastern Siberia // *Precambrian Res.*, 1995, v. 73, p. 251-270.

**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.

**Kuznetsov A.B., Bekker A., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Vasilyeva I.M.** Unradiogenic strontium and moderate-amplitude carbon isotope variations in early Tonian seawater after the assembly of Rodinia and before the Bitter Springs Excursion // *Precambrian Res.*, 2017, v. 298, p. 157-173.

**Ludwig K.R.** User's manual for Isoplot/Ex version 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publications, 2003, №4, 72 pp.

**Malyshev S.V., Pasenko A.M., Ivanov A.V., Gladkochub D.P., Savatenkov V.M., Meffre S., Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Shcherbakov V.D.** Geodynamic Significance of the Mesoproterozoic Magmatism of the Udzha Paleo-Rift (Northern Siberian Craton) Based on U-Pb Geochronology and Paleomagnetic Data // *Minerals*, 2018, v. 8, (555).

**Nagovitsin K.E., Rogov V.I., Marusin V.V., Karlova G.A., Kolesnikov A.V., Bykova N.V., Grazhdankin D.V.** Revised Neoproterozoic and Terrenuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform // *Precambrian Res.*, 2015, v. 270, p. 226-245.

**Pelechaty S.M., Kaufman A.J., Grotzinger J.P.** Evaluation of  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy for intrabasinal correlation: Vendian strata of northeast Siberia // GSA Bulletin, 1996, No. 8, p. 992-1003.

**Rooney A.D., Strauss J.V., Brandon A.D., Macdonald F.A.** A Cryogenian chronology: Two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations // Geology, 2015, v. 43, No 5, p. 459-462.

**Vishnevskaya I.A., Letnikova E.F., Vetrova N.I., Kochnev B.B., Dril S.I.** Chemostratigraphy and zircon geochronology of the Neoproterozoic Khorbusuonka Group, Olenek Uplift, Northeastern Siberian platform // Gondwana Res., 2017, v. 51, p. 255-271.

**Walter M.R., Veevers J.J., Calver C.R., Gorjan P., Hill A.C.** Dating the 840-544 Ma Neoproterozoic interval by isotopes of strontium, carbon, and sulfur in seawater, and some interpretative models // Precambrian Res., 2000, v. 100, p. 371-433.

**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: Implication for Mesoproterozoic supercontinents and paleogeography // Precambrian Res., 2009, v. 170, p. 256-266.

ПОДРИСУНОЧНЫЕ ПОДПИСИ К СТАТЬЕ Б.Б. Кочнева и др. «Sr-изотопная хемотратиграфия...»

**Рис. 1.** а) карта расположения разрезов рифея на северо-востоке Сибирской платформы. 1 - Хараулахское поднятие (см. рис. 2); 2 - Оленекское поднятие; 3 - Бурская скв. 341-0; 4 - Хастахская скв. 930; б) Схема геологического строения Чекуровской антиклинали Хараулахского поднятия (по материалам Государственной геологической карты масштаба 1:200 000). 1 - уктинская свита; 2 - эсэлахская свита; 3 - нэлегерская свита; 4 - сизтачанская свита; 5 - хараютехская свита; 6 - фанерозойские отложения; 7 - основные тектонические нарушения; 8 - положение изученных разрезов.

**Рис. 2.** Литологическая колонка и изотопно-геохимические характеристики докембрийских отложений Хараулахского поднятия. Составлена по собственным наблюдениям с дополнениями по [Pelechaty et al., 1996] и [Хабаров, Изох, 2014]. 1 - известняки; 2 - доломиты; 3 - глинистые известняки/доломиты; 4-7 - текстуры карбонатных пород: 4 - брекчированные и интракластовые, 5 - биоламинитовые, 6 - оолитовые и онколитовые, 7 - строматолитовые; 8 - алевролиты и аргиллиты; 9 - песчаники; 10 - окремнение; 11 - интрузии базитов и их мощность в м; 12 - красноцветные отложения; 13 - значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в известняках: а - неизменные, б - измененные; 14 - значения  $\delta^{13}\text{C}$  в доломитах: а - неизменные, б - измененные. Сокращения: МСШ – Международная стратиграфическая шкала, ОСШР – Общая стратиграфическая шкала России, hr – хараютехская свита, uk – уктинская свита.

**Рис. 3.** Графики зависимости соотношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от отношения Fe/Sr (а),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от отношения Mn/Sr (б), и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от содержания Sr (в). Темными значками показаны известняки, светлыми доломиты.

**Рис. 4.** График отношений  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для карбонатных осадочных пород эсэлахской свиты Хараулахского поднятия.

**Рис. 5.** Схема стратиграфии позднедокембрийских отложений северо-востока Сибирской платформы. Геохронологические данные приведены по 1) Rb-Sr по глауконитам [Зайцева и др., 2017], 2) U-Pb по обломочным цирконам [Vishnevskaya et al., 2017] и 3) Pb-Pb известняки, настоящая работа. Датировка основания венда 640 млн. лет согласно [Семихатов и др., 2015]. Сокращения: верх. – верхний, R<sub>2</sub>kt – кютингдинская свита.

ПОДРИСУНОЧНЫЕ ПОДПИСИ К СТАТЬЕ Б.Б. Кочнева и др. «Sr-изотопная хемотратиграфия...»

**Рис. 1.** а) карта расположения разрезов рифея на северо-востоке Сибирской платформы. 1 - Хараулахское поднятие (см. рис. 2); 2 - Оленекское поднятие; 3 - Бурская скв. 341-0; 4 - Хастахская скв. 930; б) Схема геологического строения Чекуровской антиклинали Хараулахского поднятия (по материалам Государственной геологической карты масштаба 1:200 000). 1 - уктинская свита; 2 - эсэлахская свита; 3 - нэлегерская свита; 4 - сизтачанская свита; 5 - хараютехская свита; 6 - фанерозойские отложения; 7 - основные тектонические нарушения; 8 - положение изученных разрезов.

**Рис. 2.** Литологическая колонка и изотопно-геохимические характеристики докембрийских отложений Хараулахского поднятия. Составлена по собственным наблюдениям с дополнениями по [Pelechaty et al., 1996] и [Хабаров, Изох, 2014]. 1 - известняки; 2 - доломиты; 3 - глинистые известняки/доломиты; 4-7 - текстуры карбонатных пород: 4 - брекчированные и интракластовые, 5 - биоламинитовые, 6 - оолитовые и онколитовые, 7 - строматолитовые; 8 - алевролиты и аргиллиты; 9 - песчаники; 10 - окремнение; 11 - интрузии базитов и их мощность в м; 12 - красноцветные отложения; 13 - значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в известняках: а - неизменные, б - измененные; 14 - значения  $\delta^{13}\text{C}$  в доломитах: а - неизменные, б - измененные. Сокращения: МСШ – Международная стратиграфическая шкала, ОСШР – Общая стратиграфическая шкала России, hr – хараютехская свита, uk – уктинская свита.

**Рис. 3.** Графики зависимости соотношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от отношения Fe/Sr (а),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от отношения Mn/Sr (б), и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от содержания Sr (в). Темными значками показаны известняки, светлыми доломиты.

**Рис. 4.** График отношений  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для карбонатных осадочных пород эсэлахской свиты Хараулахского поднятия.

**Рис. 5.** Схема стратиграфии позднедокембрийских отложений северо-востока Сибирской платформы. Геохронологические данные приведены по 1) Rb-Sr по глауконитам [Зайцева и др., 2017], 2) U-Pb по обломочным цирконам [Vishnevskaya et al., 2017] и 3) Pb-Pb известняки, настоящая работа. Датировка основания венда 640 млн. лет согласно [Семихатов и др., 2015]. Сокращения: верх. – верхний, R<sub>2</sub>kt – кютингдинская свита.

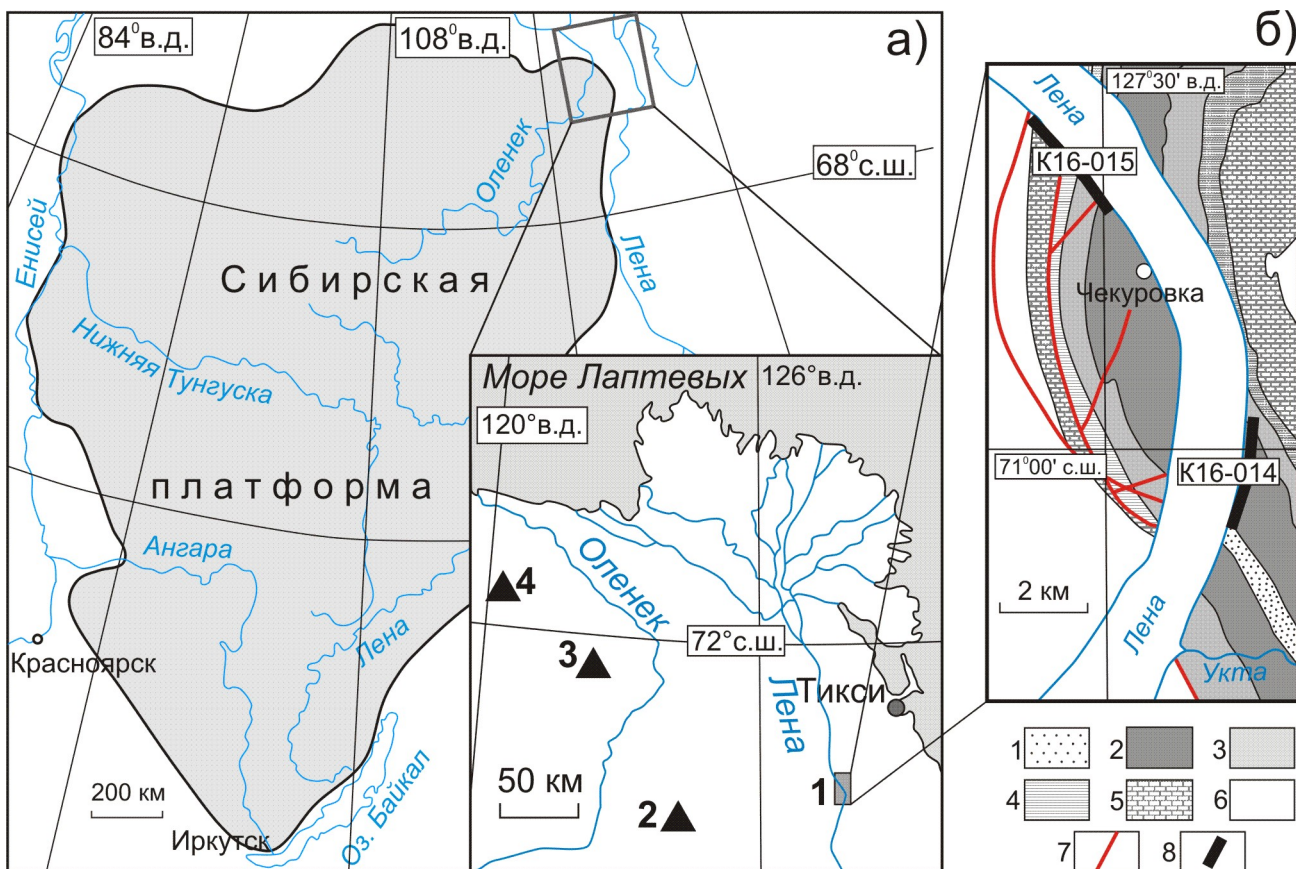
Таблица 1. Химический и Sr-изотопный состав карбонатных пород позднего докембрия Хараулахского разреза

Номер образца	Мощность, м	% н.о.	Ca, %	Mg, %	Mn, мкг/г	Fe, мкг/г	Sr, мкг/г	Rb, мкг/г	Mg/Ca	Mn/Sr	Fe/Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
Укгинская свита												
K16-126	3,5	13.2	39.4	4.0	330	1363	149	0.09	0.10	2.22	9.2	0.70707
K16-127	4,5	16.2	39.5	0.6	200	640	135	0.08	0.01	14.9	4.7	0.70728
K16-127a	5	12.3	38.3	1.2	247	514	154	0.12	0.03	1.61	3.3	0.70703
K16-128	6	21.0	37.2	2.4	290	1920	133	-	0.06	2.18	14.4	-
Эзлехская свита												
K16-144	149	18.8	38.7	1.4	16	239	188	0.11	0.04	0.08	1.3	0.70695
K16-145	151	13.2	35.5	3.3	13	332	120	-	0.09	0.11	2.7	-
K16-146	153	17.6	34.5	4.0	18	389	100	-	0.12	0.18	3.9	-
K16-147	155	16.9	37.9	2.1	11	227	119	0.06	0.06	0.10	1.9	0.70703
K16-148	157	17.6	36.3	3.0	13	335	159	0.07	0.08	0.08	2.1	0.70691
K16-149	159	18.8	36.0	3.5	10	485	160	-	0.10	0.06	3.0	-
K16-150	161	20.1	27.6	7.7	20	994	82	-	0.28	0.25	12.2	-
K16-151	163	22.1	23.9	11.0	21	993	85	0.09	0.46	0.24	11.6	0.70789
K16-156*	5	13.7	39.7	0.2	7	533	1258	0.05	0.01	0.01	0.4	0.70673
K16-157*	8	10.1	39.3	0.2	7	95	1550	0.06	0.004	0.00	0.1	0.70679
K16-159	15	18.3	39.2	0.1	10	172	420	-	0.002	0.02	0.4	-
K16-161*	22	14.8	39.1	0.2	15	340	880	0.08	0.004	0.02	0.4	0.70678
K16-162*	25	12.5	39.6	0.2	15	895	650	0.04	0.004	0.02	1.4	0.70682
K16-163*	29	12.0	39.7	0.2	7	50	848	0.06	0.01	0.01	0.1	0.70676
K16-164	32	11.9	39.3	0.3	28	745	523	0.05	0.01	0.05	1.4	0.70681
K16-166	71	9.1	38.8	0.1	10	235	423	0.08	0.004	0.02	0.6	0.70696
K16-167*	74	2.8	38.9	0.1	23	530	256	0.06	0.003	0.09	2.1	0.70715
K16-168*	78	1.1	39.3	0.1	21	368	350	0.04	0.003	0.06	1.1	0.70694
K16-169*	81	1.9	38.5	0.1	12	198	405	0.04	0.003	0.03	0.5	0.70697
Нэлегерская свита												
K16-182	169	3.8	38.3	0.9	11	105	250	0.09	0.025	0.04	0.4	0.70791
K16-186	186	13.5	37.7	0.2	270	980	480	-	0.01	0.57	2.1	-
K16-188	197	15.7	37.0	0.5	230	1390	1196	0.18	0.01	0.02	1.1	0.70792
Сизтачанская свита												
K16-207	293	6.1	34.0	3.6	296	3960	537	0.12	0.11	0.55	7.4	0.70802
K16-209	301	4.1	33.4	3.7	544	3050	467	0.07	0.11	1.17	6.5	0.70800
K16-213	325	16.0	32.8	4.6	470	2420	410	-	0.14	1.15	5.9	-
K16-215	341	6.5	38.4	1.0	152	434	350	-	0.03	0.43	1.2	-
K16-218	365	1.2	35.4	1.4	146	830	465	0.08	0.04	0.31	1.8	0.70803
K16-222	387	1.0	38.6	0.5	484	1040	997	0.06	0.01	0.49	1.0	0.70814
K16-228	438	2.5	37.6	1.0	450	800	418	-	0.03	1.08	1.9	-
K16-232	474	2.6	38.6	0.3	1440	240	525	0.07	0.01	2.74	0.5	0.70817
K16-237	529	5.8	25.0	8.8	2950	3600	547	-	0.35	5.40	6.6	-

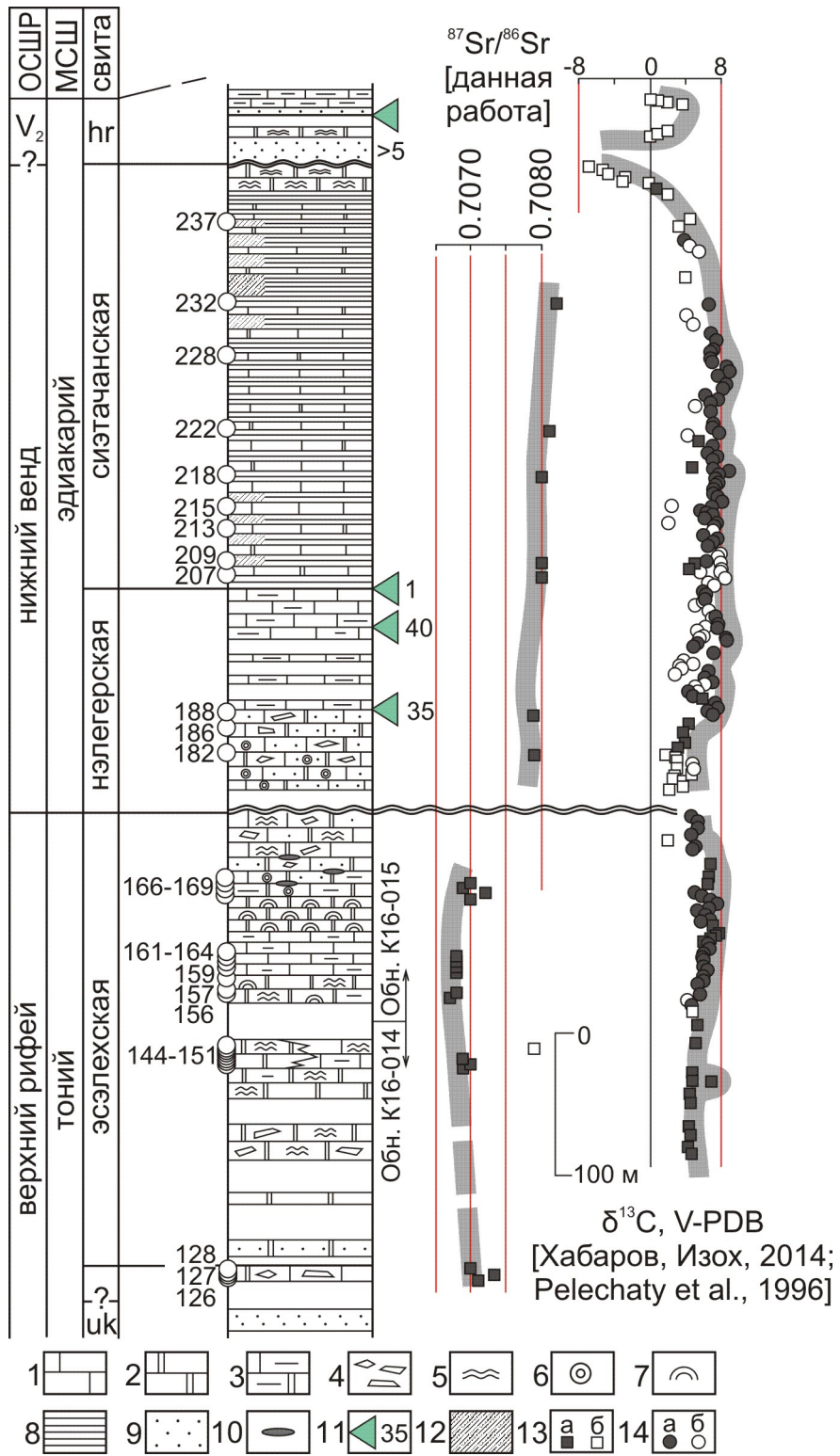
Примечания. Прочерк – не определялось. Положение образцов с K16-126 по K16-151 указано от основания разреза K16-014; для образцов с K16-156 по K16-237 – от основания разреза K16-015. Звездочкой помечены образцы, использованные для расчета Pb-Pb изохронного возраста (см. табл. 2).

Таблица 2. Изотопный состав Рb в известняках эсэлехской свиты.

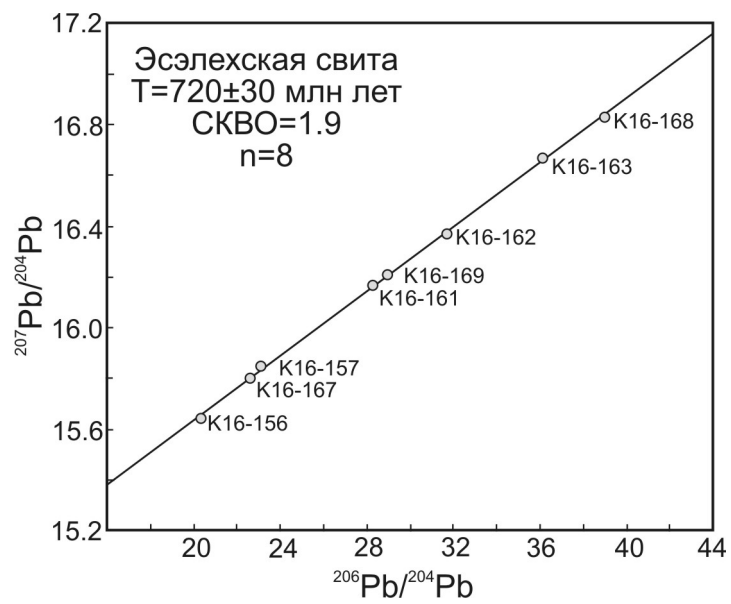
Образец	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
K16-156	20.336	15.644	38.922
K16-157	23.112	15.849	39.357
K16-161	28.271	16.166	41.483
K16-162	31.698	16.372	40.361
K16-163	36.122	16.669	39.734
K16-167	22.590	15.804	38.846
K16-168	38.979	16.828	39.002
K16-169	28.963	16.209	38.579











МСШ		ОСШР		млн. лет	Лено-Анабарский прогиб	Оленекское поднятие	Хараулахское поднятие			
неопротерозой	эдиакарий	криогений	венд	верх.	хатыспытская свита		хараютехская свита			
					580	маастакская свита <math><600^2</math>		сиэтанская свита		
мезопротерозой	эктазий стений	верхний рифей	нижний	640			нэлегерская свита			
							720	хастакская свита		эсэлехская свита <math>720\pm 30^3</math>
							1000			куладинская свита
					1000	тукуланская свита		?		
					1200	?		хайпахская свита <math>1172\pm 18^1</math>		
								дебенгдинская свита <math>1265\pm 12^1</math>		
			арымасская свита <math>1305\pm 8^1</math>							
				R <sub>2</sub> kt						