

Sr-ИЗОТОПНАЯ ХЕМОСТРАТИГРАФИЯ И Pb-Pb ВОЗРАСТ КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РИФЕЯ ХАРАУЛАХСКОГО ПОДНЯТИЯ (северо-восточная окраина Сибирской платформы)

Б.Б. Кочнев^{1,2}, А.Б. Кузнецов³, Д.Р. Ситкина³, А.Ю. Крамчанинов³

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

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия*

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

В разрезе докембрия Хараулахского поднятия наименее измененные известняки уктинской и эсэ-лехской свит имеют минимальные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.70673—0.70715. В свою очередь, вышележащие нэлегерская и сизтачанская 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 эсэ-лехской свит в интервале 800—670 млн лет, а нэлегерской и сизтачанской свит – около 640—580 млн лет. Изохронный Pb-Pb возраст наименее измененных известняков эсэ-лехской свиты, рассчитанный по восьми образцам, составляет 720 ± 30 млн лет. Эта датировка позволяет относить нижнюю часть Хараулахского разреза в объеме уктинской и эсэ-лехской 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.

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

Sr ISOTOPE CHEMOSTRATIGRAPHY AND Pb-Pb AGE OF THE RIPHEAN CARBONATE DEPOSITS OF THE KHARAUAKH UPLIFT (northeastern margin of the Siberian Platform)

B.B. Kochnev, A.B. Kuznetsov, D.R. Sitkina, A.Yu. Kramchaninov

The least altered limestones of the Ukta and Eselekh formations in the Precambrian section of the Kharaulakh uplift have a minimum $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of 0.70673–0.70715. The lowest $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of the overlying Neleger and Sietachan formations is 0.70791–0.70817. Based on these data, along with the earlier obtained positive $\delta^{13}\text{C}$ values (up to 8 ‰) for the Kharaulakh section, we have estimated the age of the Ukta and Eselekh formations at 800–670 Ma and the age of the Neleger and Sietachan formations at ~640–580 Ma. The Pb–Pb isochron age of the least altered limestones of the Eselekh Formation calculated from eight samples is 720 ± 30 Ma. This age permits us to define the lower part of the Kharaulakh section of the Ukta and Eselekh formations to be the late Tonian of the International Chronostratigraphic Chart or to the Upper Riphean of the General Stratigraphic Scale of Russia. The presence of reliably dated Upper Riphean sediments in the Kharaulakh uplift indicates a more complex structure of the Precambrian sedimentary cover on the Arctic margin of the Siberian Platform than assumed earlier.

Neoproterozoic, sedimentary carbonates, carbon isotopes, strontium isotopes, Pb–Pb geochronology, isotope chemostratigraphy, Siberian Platform, Kharaulakh uplift

ВВЕДЕНИЕ

Рифейские отложения занимают заметное место в строении осадочного чехла северо-восточной окраины Сибирской платформы. Они обнажаются в южной части Оленекского поднятия в междуречье рек Оленек и Лена, а также на юге Хараулахского поднятия в нижнем течении Лены (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].

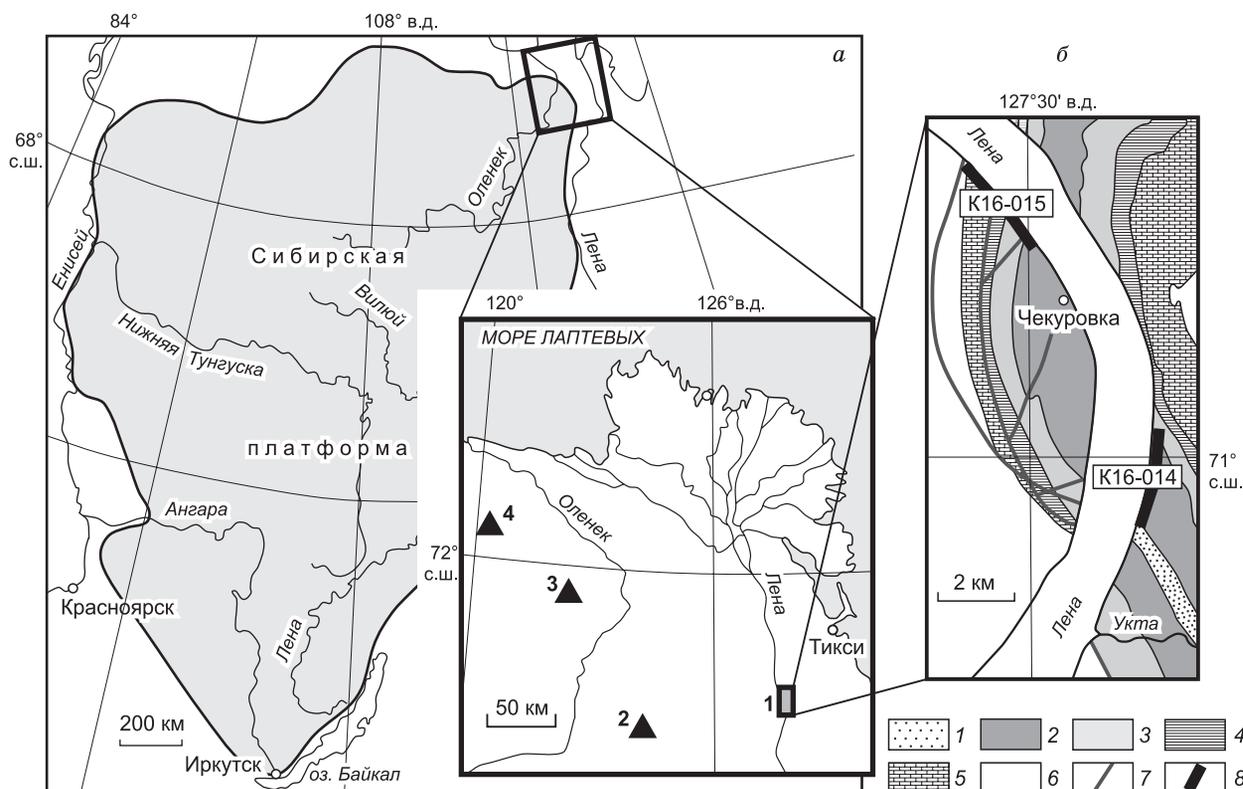


Рис. 1. а — карта расположения разрезов рифея на северо-востоке Сибирской платформы. **б** — схема геологического строения Чекуровской антиклинали Хараулахского поднятия (по материалам Государственной геологической карты м-ба 1:200 000).

а: 1 — Хараулахское поднятие (см. рис. 2); 2 — Оленекское поднятие; 3 — Бурская скв. 341-0; 4 — Хастахская скв. 930; *б*: 1 — уктинская свита; 2 — эсэлекская свита; 3 — нэлегерская свита; 4 — сизтачанская свита; 5 — хараутехская свита; 6 — фанерозойские отложения; 7 — основные тектонические нарушения; 8 — положение изученных разрезов.

Представления о возрасте рифейских отложений Оленекского и Хараулахского поднятий и об их корреляции между собой изначально, во второй половине XX в., основывались на анализе вертикального распространения строматолитов и на валовых K-Ag 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, эсэлекская, нэлегерская и сизтачанская 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; Шенфильд, 1991].

В начале XXI в. 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 позднедокембрийского 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 Лены расположены стратотипы выделяемых свит. Отложения

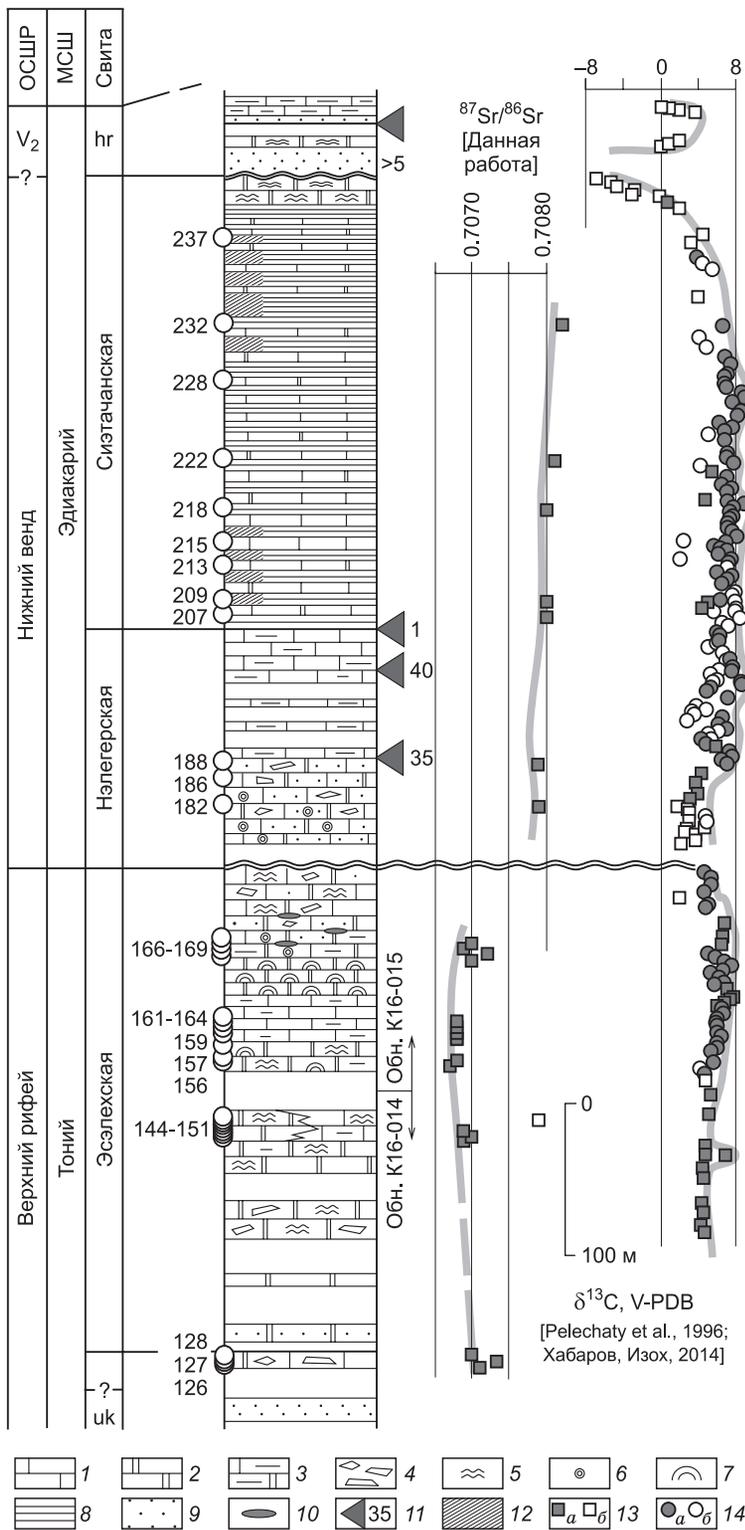


Рис. 2. Литологическая колонка и изотопно-геохимические характеристики докембрийских отложений Хараулахского поднятия. Составлена по собственным наблюдениям с дополнениями по [Pelechaty et al., 1996; Хабаров, Изох, 2014].

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, 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. МСШ — Международная стратиграфическая шкала, ОСШР — Общая стратиграфическая шкала России, hr — хараулахская свита, uk — уктинская свита.

позднего докембрия общей мощностью свыше 1100 м слагают ядро крупной Чекуровской антиклинали, осложненной более мелкими тектоническими нарушениями, и прорваны серией силлов раннекембрийского возраста (см. 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 Лены в 2 км ниже устья р. Укта (обн. К16-014; основание изученного разреза 70.9744° с.ш., 127.5890° 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 калькарени-тов. Доломиты и известняки, как и строматолитовые постройки и продукты их разрушения, могут замещать друг друга по простиранию. Средняя и

верхняя части эсэлекской свиты, как и вышележащие толщи, лучше обнажены по левому берегу Лены в 2 км ниже пос. Чекуровка (обн. К16-015, основание изученного разреза 71.0615° с.ш., 127.5001° в.д.). Здесь они, как и в нижней части, представлены чередованием строматолитовых 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 прокси-мальные штормовые темпеститы и турбидиты [Хабаров, Изох, 2014]. Мощность эсэлекской свиты 320 м.

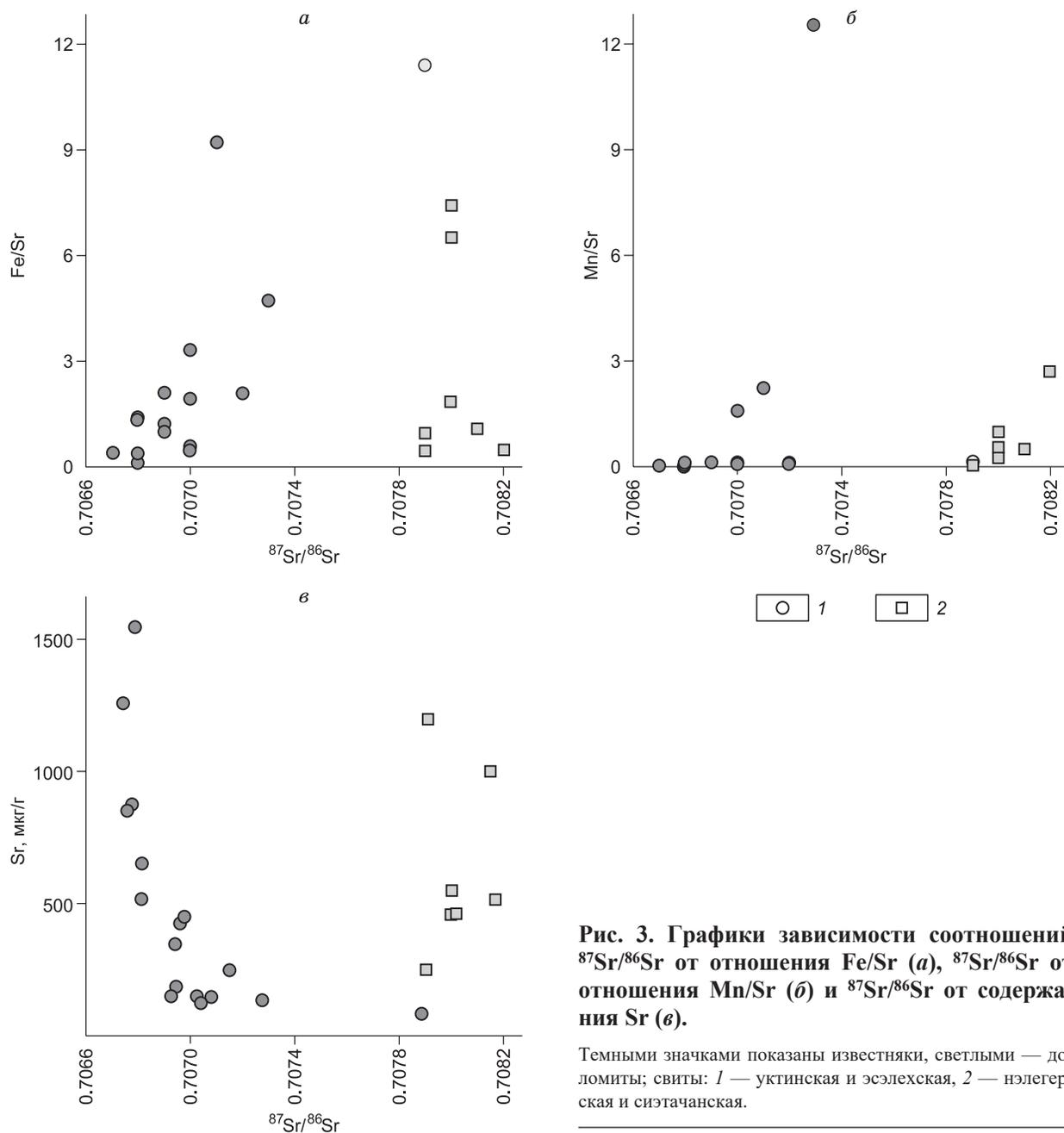


Рис. 3. Графики зависимости соотношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от отношения Fe/Sr (а), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от отношения Mn/Sr (б) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от содержания Sr (в).

Темными значками показаны известняки, светлыми — доломиты; свиты: 1 — уткинская и эсслехская, 2 — нэлегерская и сиэтачанская.

Нэлегерская свита сложена в нижней части преимущественно доломитами, тогда как в верхней части преобладают известняки. В отличие от подстилающей эсслехской 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 песчаные 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 приконтактных 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.

Сиэтачанская свита, за исключением самой верхней части, имеет выраженное ритмичное строение и смешанный карбонатно-терригенный состав. Нижние части ритмов, которых в составе свиты на-

считывается более 50, сложены тонкослоистыми алевролитами и аргиллитами серой, зеленовато-серой, а также красно-бурой окраски. Верхние части (от 0.3—0.5 до 1.0—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 встречаются волнистая и линзовидная, а также трещины усыхания. Вверх по разрезу мощность ритмов возрастает от 1.5—2.0 до 10—15 м и более, в основном за счет увеличения мощности алевроаргиллитовых пачек. Обстановки осадконакопления сизэчанской 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 сизэчанской свиты около 300 м. Выше залегают грубозернистые песчаники, с которых в этом разрезе принято начинать хараутехскую 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]. 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 в работах [Pelechaty et al., 1996; Хабаров, Изох, 2014] (см. рис. 2).

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 измеряли на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI. Средние значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в стандартных образцах NIST SRM 987 и EN-1 составляли в период работы соответственно 0.710289 ± 0.000005 ($2\sigma_{\text{средн.}}, n = 28$) и 0.709213 ± 0.000008 ($2\sigma_{\text{средн.}}, n = 7$). 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 эсэлехской 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 растворяли в 1N HCl при комнатной температуре. Раствор каждой фракции делили 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 при вычислении возраста определялись с учетом измерения серии соответ-

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

№ образца	Глубина, м	% н.о.	Ca	Mg	Mn	Fe	Sr	Rb	Mg/Ca	Mn/Sr	Fe/Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
			%		мкг/г							
Уктинская 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	—
Эсэлекская 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
Сизгачанская 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	—

Примечание. Прочерк — не определялось; н.о. — нерастворимый осадок. 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).

ствующих образцов и стандарта NIST SRM 981. Средние погрешности воспроизводимости отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 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 (Mg/Ca = 0.01—0.46). Содержание алюмо-

силикатной примеси для этого интервала разреза составляет от 12.3 до 22.1 % (см. 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 для целей Sr-изотопной хемотратиграфии шесть 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 ($Mg/Ca < 0.01$). 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 (см. 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 эсэлекской 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 эсэлекской свиты и все образцы из уктинской свиты не вполне пригодны для этой цели.

Отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в 13 образцах известняков эсэлекской свиты лежат в интервале 0.70673—0.70715 (см. 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 трех изученных образцах уктинской свиты заключены в пределах 0.70703—0.70728. Характерно, что отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ для известняков уктинской и эсэлекской свит растет по мере уменьшения концентрации стронция (см. рис. 3, в), что может отражать изменение изотопного состава стронция и его некоторую потерю при постседиментационных изменениях.

Нэлегерская и сизтачанская свиты. Изученные 12 образцов представлены известняками и в меньшей степени слабодоломитистыми 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 девяти образцов оно не превышает 6 % (см. 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 сизтачанской 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 в пяти известняках сизтачанской свиты находится в интервале от 0.70800 до 0.70817. Эти значения существенно выше, чем отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ в подстилающих эсэлекской и уктинской свитах (см. табл. 1). Вариации отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в изученных образцах нэлегерской и сизтачанской свит, в отличие от подстилающих отложений, не связаны с изменением концентрации стронция (см. рис. 3, в), что может указывать на меньшую степень постседиментационных изменений.

Сравнение геохимических характеристик карбонатных пород в нашей выборке (см. 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. K16-188), но имеют значение $^{87}Sr/^{86}Sr$, равное 0.70792 (см. 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 его интервалов сохранили первичные C- и Sr-изотопные характеристики и пригодны для хемотратиграфических построений.

РЬ–РЬ ВОЗРАСТ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ЭСЭЛЕХСКОЙ СВИТЫ

Изучение U–Pb систематики известняков проведено в восьми наименее измененных образцах из эсэлекской свиты. Выбранные образцы удовлетворяют строгим геохимическим критериям ($Mn/Sr < 0.2$, $Fe/Sr < 3$), указывающим на отсутствие значимых нарушений изотопной системы известняков и на их пригодность для изотопно-геохронологических исследований [Кузнецов и др., 2005, 2008]. Измеренные отношения $^{206}Pb/^{204}Pb$ и $^{207}Pb/^{204}Pb$ в известняках эсэлекской свиты варьируют от 20.336 до 38.979 и от 15.644 до 16.828 соответственно (табл. 2). Отношение $^{208}Pb/^{204}Pb$ 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 [Семихатов и др.,

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

2004; Овчинникова и др., 2007, 2012; Kuznetsov et al., 2013, 2017]. Рассчитанное значение возраста для известняков эсэлехской свиты равно 720 ± 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 эсэлехской 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; Kuznetsov 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 ± 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 ± 4.5 млн лет [Rooney et al., 2015]. В пользу отнесения нижней части осадочной последовательности в объеме уктинской и эсэлехской свит к среднему неопротерозою свидетельствуют данные C-изотопной хемотратиграфии [Хабаров, Изох, 2014]. Полученные для этих свит значения $\delta^{13}\text{C}$, достигающие +7.1...+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 эсэлехской 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 ± 30 млн лет. Таким образом, возраст карбонатных осадков эсэлехской свиты можно считать позднеперифейским [Семихатов и др., 2015], а в Международной хроностратиграфической шкале он отвечает терминальным горизонтам тония [<https://stratigraphy.org/chart>].

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

В свою очередь, сочетание изотопных характеристик карбонатных пород для нэлегерской и сизэчанской свит ($\delta^{13}\text{C}$ до +8.5...+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 эсэлехской свит, возможно, указывающая на влияние метеорных вод во время преднэлегерского перерыва. Близкие к полученным для нэлегерской и сизэчанской 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 сизэчанской свит изотопные характеристики отчасти близки к

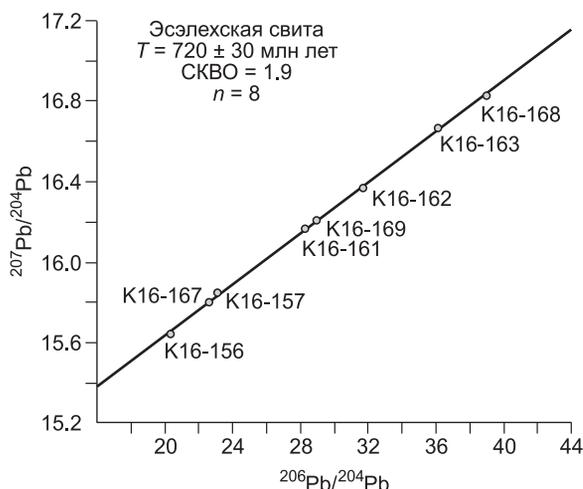


Таблица 2. Изотопный состав Pb в известняках эсэлехской свиты

№ образца	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
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

таковым для доломитов верхней части маастахской свиты Оленекского поднятия ($\delta^{13}\text{C} = 3.6\text{...}6.5\text{ ‰}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.7082$) [Knoll et al., 1995; Pelechaty et al., 1996], максимальный возраст 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 хараулахской свиты Хараулахского поднятия с хатыспытской и туркутской свитами верхнего венда в бассейне 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- и среднерифейского возраста развитой здесь сололийской серии, наряду с U-Pb возрастом 1473 ± 24 млн лет прорывающего ее нижнюю часть силла [Wingate et al., 2009], являются K-Ar и Rb-Sr возрасты раннего диагенеза глауконитов арымасской, дебенгдинской и хайпахской свит. Они дают последовательно уменьшающийся снизу вверх ряд значений от 1305 ± 8 до 1172 ± 18 (Rb-Sr) и от 1302 до 1112 ± 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 $0.0\text{...}-1.3\text{ ‰ V-PDB}$ [Ивановская и др., 2014]. Значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в известняках из этого же уровня и из средней части хайпахской свиты составляют $0.70490\text{--}0.70493$ [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].

Обстановка 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 палеопргибе, 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., 2003, 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 по большей части развиты нижне- и среднерифейские отложения [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 1.0—1.5 км) осадочных толщ верхнего рифея позволяет предполагать, что они были развиты и на самом Оленекском

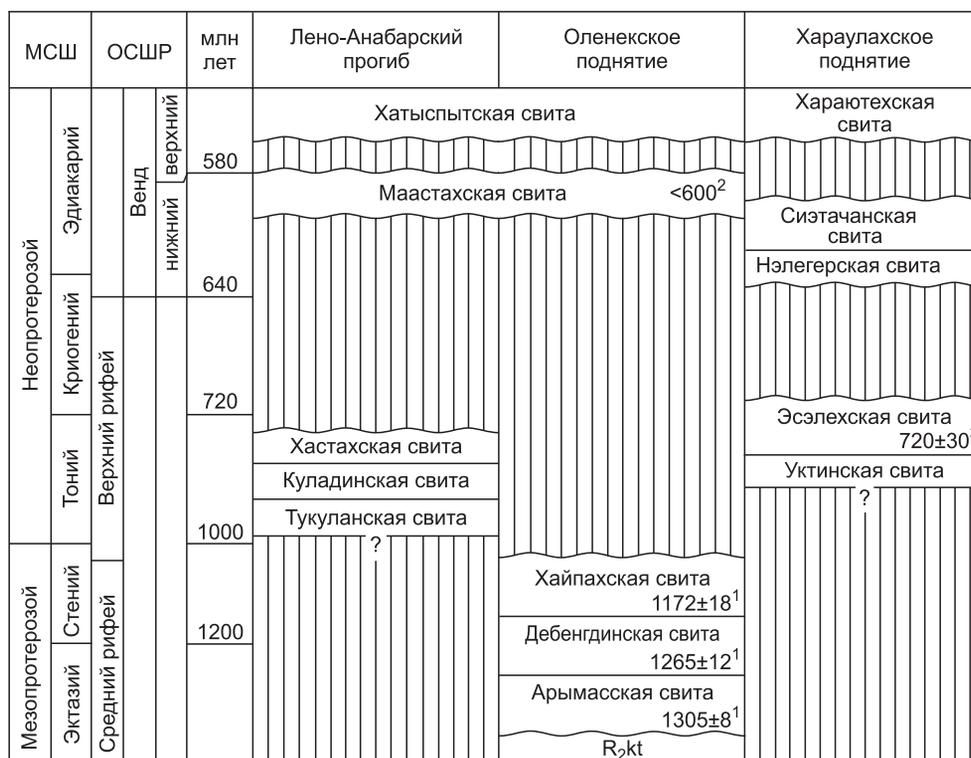


Рис. 5. Схема стратиграфии позднедокембрийских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Геохронологические данные приведены: ^1Rb-Sr по глауконитам [Зайцева и др., 2017], ^2U-Pb по обломочным цирконам [Vishnevskaya et al., 2017] и ^3Pb-Pb по известнякам, настоящая работа. Датировка основания венда 640 млн лет согласно [Семихатов и др., 2015]. R_2kt – кютингдинская свита.

поднятию, 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 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 $\delta^{13}C$ до +8.5 ‰ [Хабаров, Изох, 2014], известняки уктинской и эсэлахской свит имеют минимальные значения $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70673-0.70715$, 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 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 эсэлахской и нэлегерской свитами подтверждается и седиментологическими наблюдениями.

Осуществлено первое прямое изохронное Pb-Pb датирование известняков эсэлахской свиты, возраст которых составил 720 ± 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.

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.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-05-00418, 18-05-70110 и при содействии проекта РНФ № 18-17-00247.

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 // ДАН, 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 O-изотопная систематика среднерифейских аргиллитов дебенгдинской свиты Оленекского поднятия (северная Сибирь) // Стратиграфия. Геологическая 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 хемостратиграфические следствия // ДАН, 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 C-O геохимия и Pb-Pb возраст доломитов // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2019, т. 27, № 5, с. 19—35.

Граусман В.С., Рудаевская 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. Геологическая 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. Геологическая 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 глауконитосодержащих 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 // ДАН, 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, № 7с, 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 байкальской 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. Геологическая 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. Геологическая корреляция, 2014, т. 22, № 6, с. 3—25.

Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Стронциевая изотопная хемотратиграфия: основы метода и его современное состояние // Стратиграфия. Геологическая 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. Геологическая 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. Геологическая 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. Геологическая корреляция, 2012, т. 20, № 6, с. 28—40.

Подковыров В.Н., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Виноградов Д.П., Козлов В.И., Кислова И.В. Изотопный состав карбонатного углерода в стратотипе верхнего рифея (каратавская серия Южного Урала) // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 1998, т. 6, № 4, с. 3—19.

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., Каурова О.К., Петров П.Ю. Pb-Pb изохронный возраст и Sr-изотопная характеристика верхнеюдомских карбонатных отложений (венд Юдомо-Майского прогиба, Восточная Сибирь) // ДАН, 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 соотношения с вендом // Стратиграфия. Геологическая 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 (рифей и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геологическая 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.

Шенфильд 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., Пермьков 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 // J. Geol., 2000, v. 108, p. 381—401.

Halverson G.P., Wade B.P., Hurtgen 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 Publication № 4, 2003, 72 p.

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 (12), p. 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 Terreneuvian 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 Bull.*, 1996, № 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 (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.

*Рекомендована
Н.В. Сенниковым*

*Поступила в редакцию 16 мая 2019 г.,
принята в печать 2 сентября 2019 г.*