

УДК 551.72:571.5:550.42+550.384+550.93

С- И Sr-ИЗОТОПНАЯ ХЕМОСТРАТИГРАФИЯ И Pb–Pb ВОЗРАСТ КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОРОГОВСКОЙ СЕРИИ (НЕОПРОТЕРОЗОЙ), СЕВЕРО-ЗАПАД ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

© 2019 г. Б. Б. Кочнев^{1, 2, *}, А. Б. Кузнецов³, Б. Г. Покровский⁴,
Д. Р. Ситкина³, З. Б. Смирнова³

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург

⁴ Геологический институт РАН, Москва

*e-mail: KochnevBB@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию 29.05.2018 г.

Получена после доработки 15.06.2018 г.

Принята к публикации 25.10.2018 г.

Получена С- и Sr-изотопная характеристика и определен Pb–Pb возраст карбонатных пород вороговской серии в ее типовом разрезе по р. Вороговка на северо-западе Енисейского кряжа. Отложения серии в составе северореченской, мутнинской и сухореченской свит выполняют крупный прогиб, а литолого-структурные признаки указывают на быструю седиментацию. Большинство карбонатных пород представлено известняками с низкими отношениями Fe/Sr и Mn/Sr при среднем значении $\delta^{18}\text{O} -6.0 \pm 1.6\text{‰}$ V-PDB, что указывает на хорошую сохранность изотопных систем пород. Отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и значения $\delta^{13}\text{C}$ в известняках верхней части северореченской свиты варьируют в узких пределах 0.70816–0.70826 и $-1.4...+0.8\text{‰}$ соответственно, а в известняках сухореченской свиты – в пределах 0.70818–0.70829 и $+1.0...+2.0\text{‰}$ соответственно. Pb–Pb изохронный возраст карбонатных пород северореченской свиты равен 580 ± 40 млн лет (СКВО = 1.4), а сухореченской свиты 565 ± 90 млн лет (СКВО = 1.1). Исходя из имеющихся хемотратиграфических и изотопно-геохронологических данных, накопление известняковых осадков вороговской серии могло происходить 580–550 млн лет назад, что отвечает позднему венду или позднему эдиакарию. Длительность накопления вороговской серии, вероятнее всего, не превышала 10–15 млн лет. Вороговский прогиб отличался по характеру осадконакопления от других поздневендских краевых прогибов юго-запада Сибирской платформы и формировался независимо от них.

Ключевые слова: венд, карбонатные породы, С- и Sr-изотопная хемотратиграфия, Pb–Pb геохронология, корреляция, Енисейский кряж.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-592X27597-112>

ВВЕДЕНИЕ

Вороговская серия представлена мощной (до 4 км) сероцветной терригенно-карбонатной толщей в северо-западной части Енисейского кряжа (Николаев, 1924). Первоначально эти отложения в ранге свиты были отнесены к нижнему кембрию (Семихатов, 1962). В дальнейшем их возраст был пересмотрен, и вороговскую серию на основании региональных корреляций отнесли к байкальскому горизонту верхней части верхнего рифея (Хоментовский и др., 1972; Решения..., 1983). В таком виде вороговская серия фигурирует на официальных геологических картах (Качевский и др., 1998; Государственная...,

2010), где сопоставляется с чингасанской серией, распространенной восточнее в Тейско-Чапском прогибе.

В отличие от многих позднедокембрийских толщ юго-западной окраины Сибирского кратона, для вороговской серии характерно широкое распространение известняков при почти полном отсутствии доломитов. В то же время в ней отсутствуют красноцветные обломочные породы и эвапориты. В отложениях серии широко развиты оползневые и ритмично-слоистые текстуры, указывающие на склоновые обстановки и высокую скорость осадконакопления. В сочетании с анализом площадного распространения, это

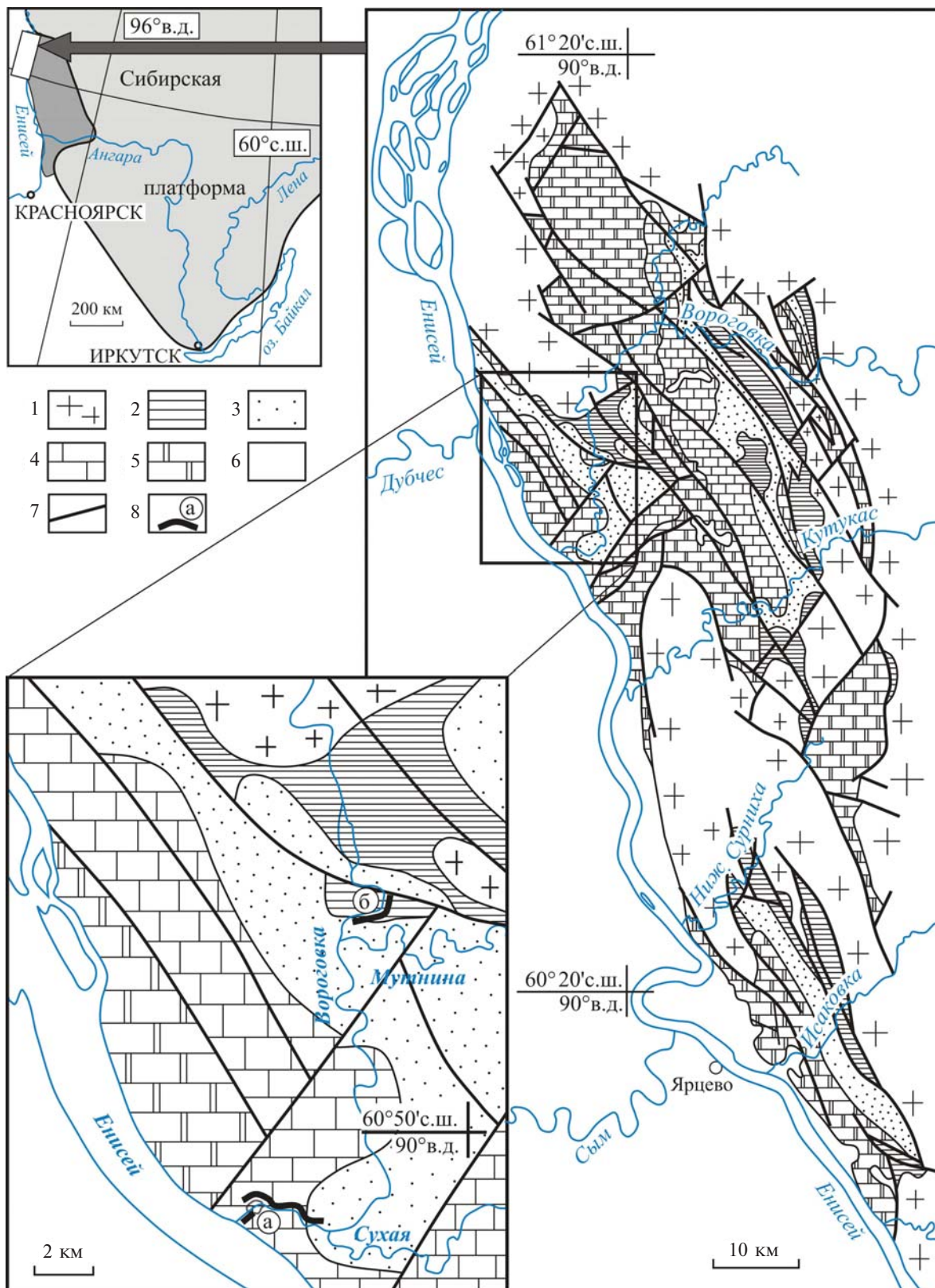


Рис. 1. Фрагмент геологической карты северо-западной части Енисейского кряжа и расположение изученных разрезов в нижнем течении р. Вороговка (Качевский и др., 1998, с дополнениями).

1 – осадочные и интрузивно-метаморфические образования рифея; 2–4 – вороговская серия: 2 – северореченская свита, 3 – мутнинская свита, 4 – сухореченская свита; 5 – отложения верхов венда и кембрия (лебяжинская свита и эвенкийская серия); 6 – мезозойские и кайнозойские отложения; 7 – тектонические нарушения; 8 – положение изученных разрезов: а – приустьевая часть р. Вороговка, б – р. Вороговка выше устья р. Мутнина.

позволило реконструировать вороговский осадочный бассейн как авлакоген, развивавшийся на западной (в современных координатах) окраине Сибирского кратона (Советов, Благовидов, 1996).

Отсутствие достоверных геохронологических и палеонтологических данных о возрасте вороговской серии затрудняло реконструкцию ее положения в ряду позднекембрийских осадочных бассейнов вдоль юго-западной окраины кратона. Согласно первым Sr-хемотратиграфическим

данным, возраст карбонатных пород серии предполагался “не древнее позднего венда”, что допускало отнесение отложений к верхнему венду или даже к низам кембрия (Постников и др., 2008). С другой стороны, грубообломочные породы в основании вороговской серии недавно было предложено рассматривать как тиллиты (Sovetov, Le Heron, 2016), что позволяло относить вороговскую серию к криогению (635–720 млн лет) Международной стратиграфической шкалы (МСШ).

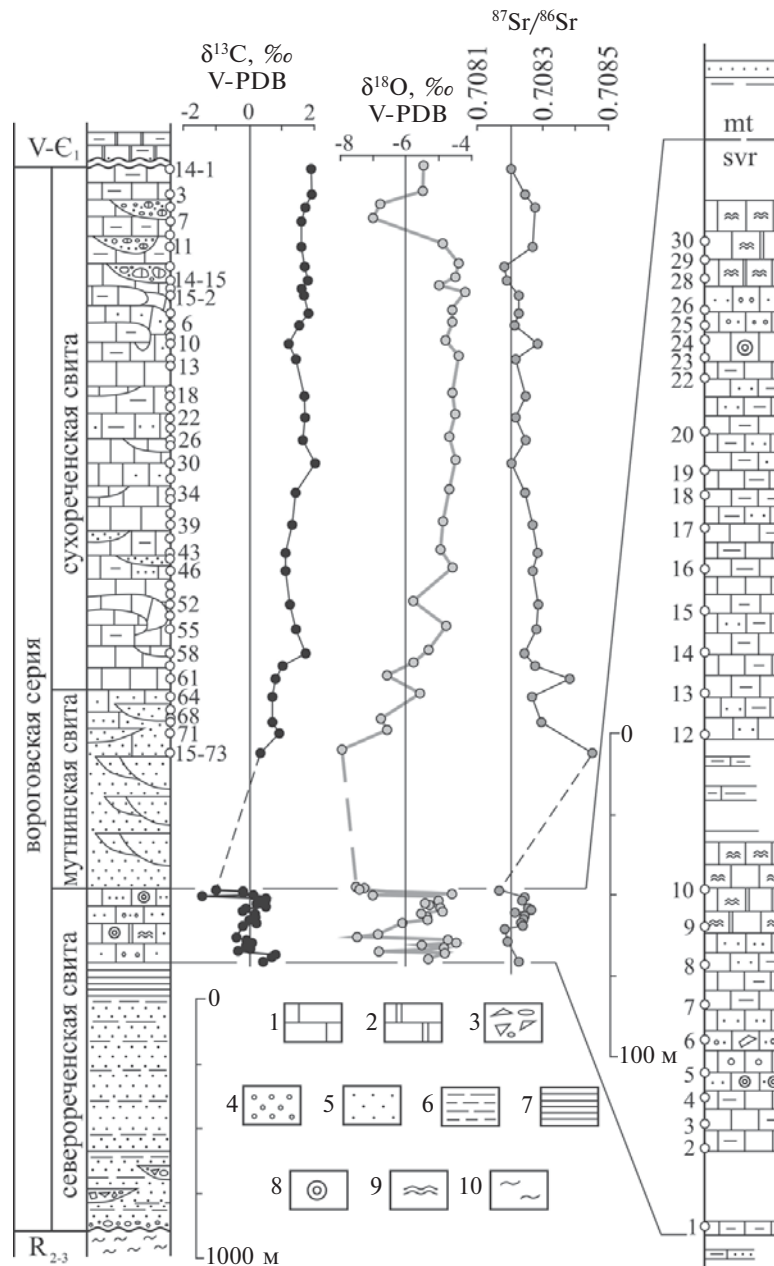


Рис. 2. Литологическая колонка и изотопно-геохимические характеристики отложений вороговской серии в нижнем течении р. Вороговка.

1 – известняки; 2 – доломиты; 3 – конглобрекции; 4 – конгломераты и гравелиты; 5 – песчаники; 6 – алевролиты, 7 – аргиллиты; 8 – оолитовые карбонатные породы; 9 – биоламинитовые карбонатные породы; 10 – отложения кутукасской серии верхнего рифея. mt – мутнинская свита, svr – северореченская свита

Целью настоящей работы было комплексное геохимическое, С- и Sr-хемостратиграфическое и Pb–Pb изотопно-геохронологическое изучение осадочных карбонатных пород вороговской серии, что позволило получить первые данные о возрасте отложений серии, расширить представления о вариациях $\delta^{13}\text{C}$ и отношениях $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в слагающих ее породах и на этой основе уточнить стратиграфическое положение вороговской серии и ее геодинамическую позицию в тектонической структуре Енисейского кряжа.

СТРАТИГРАФИЯ И ОБСТАНОВКИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Вороговская серия выделяется на северо-западе Енисейского кряжа на правобережье р. Енисей на территории от р. Порожная на севере до р. В. Сурниха на юге (рис. 1). Наиболее представительные и мощные разрезы серии расположены в нижнем течении р. Вороговка и неоднократно описаны ранее (Семихатов, 1962; Хоментовский и др., 1972; Советов, Благовидов, 1996 и др.) (рис. 2). К югу и востоку мощность отложений существенно сокращается (Государственная..., 2010). В составе серии выделяются (снизу вверх) северореченская, мутнинская и сухореченская свиты.

Северореченская свита с размывом и угловым несогласием залегает на метаморфизованных вулканогенно-осадочных образованиях, выделяемых в качестве киселихинской и отравихинской свит кутукаской серии (Качевский и др., 1998; Государственная..., 2010). С этими толщами ассоциируют породы основного и ультраосновного состава с U–Pb возрастом циркона 682 ± 13 млн лет (Кузьмичев и др., 2008). Из линзы миндалекаменных базальтов в поле развития тектонически рассланцованных пород киселихинской толщи получена U–Pb датировка по цирконам 572 ± 7 млн лет (Лиханов, Ножкин, 2018). Нижняя часть северореченской свиты (рис. 2) сложена гравелитами и конгломератами с грубой косою и мутьювидной слоистостью, которые могли выполнять русла потоков и каналов. По мнению Ю.К. Советова и Д. Ле Херона, эти плохо сортированные грубообломочные породы можно интерпретировать как диамиктиты ледникового происхождения (Sovetov, Le Heron, 2016). Однако этот вывод не подтверждается нашими наблюдениями. Вверх по разрезу грубообломочные осадки быстро сменяются песчаниками и алевролитами, слагающими среднюю часть свиты. Верхняя часть северореченской свиты представлена пачкой серых и черных алевролитов и аргиллитов мощностью 100 м, которые вверх по разрезу сменяются разнообразными известняками (глинистыми, песчанистыми, фито-

литовыми и строматолитовыми) мощностью до 250 м. На отдельных уровнях отмечается доломитизация, приуроченная к горизонтам биогенных строматолитовых известняков (рис. 3). Общая мощность северореченской свиты в нижнем течении р. Вороговка по оценкам разных авторов составляет от 800 до 1300 м (Семихатов, 1962; Государственная..., 2010). Такой разброс связан с неполной обнаженностью и общей дислоцированностью разреза.

Переход к вышележащей мутнинской свите постепенный и выражается в увеличении силикокластического обломочного материала в карбонатных породах. Основная по мощности часть мутнинской свиты представлена флишевыми ритмично-слоистыми зеленовато-серыми полимиктовыми песчаниками. В верхней части свиты наблюдается постепенный переход к известнякам сухореченской свиты. Мощность мутнинской свиты в изученном районе составляет около 800–900 м.

Сухореченская свита сложена преимущественно известняками, часто глинистыми и запесоченными, с прослоями и линзами песчаников и внутрiformационных конгломератов. Для отложений свиты характерны текстуры деформации осадка, оползания и русла каналов. Линзы и прослои грубообломочных пород в основном встречаются в верхней части свиты. Общая мощность свиты в разрезе приустьевой части р. Вороговка достигает 2200 м. Свита несогласно перекрывается отложениями лебяжинской свиты верхов венда–нижнего кембрия (Семихатов, 1962). Во всех других районах контакт с более молодыми отложениями описывается как тектонический (Государственная..., 2010).

Обстановки осадконакопления вороговской серии детально реконструированы в работах Ю.К. Советова с соавторами (Советов, Благовидов, 1996; Sovetov, Le Heron, 2016). Отложения вороговской серии формировались в грабенообразном прогибе (авлакогене), располагавшемся на краю эпиплатформенного бассейна и открытом в сторону моря на запад в современных координатах. В раннесеверореченское время флювиальные и оползневые образования начальной стадии заложения прогиба быстро сменялись склоновыми и дельтовыми фациями, которые в поздне северореченское время переходили в обстановки мелководной карбонатной платформы. Мутнинское время отвечает стадии углубления бассейна и переходу к обстановкам основания континентального склона. Сухореченское время соответствует замедлению прогибания, постепенному заполнению бассейна и переходу к мелководному карбонатному шельфу, на который эпизодически продолжал поступать обломочный материал с бортов прогиба.

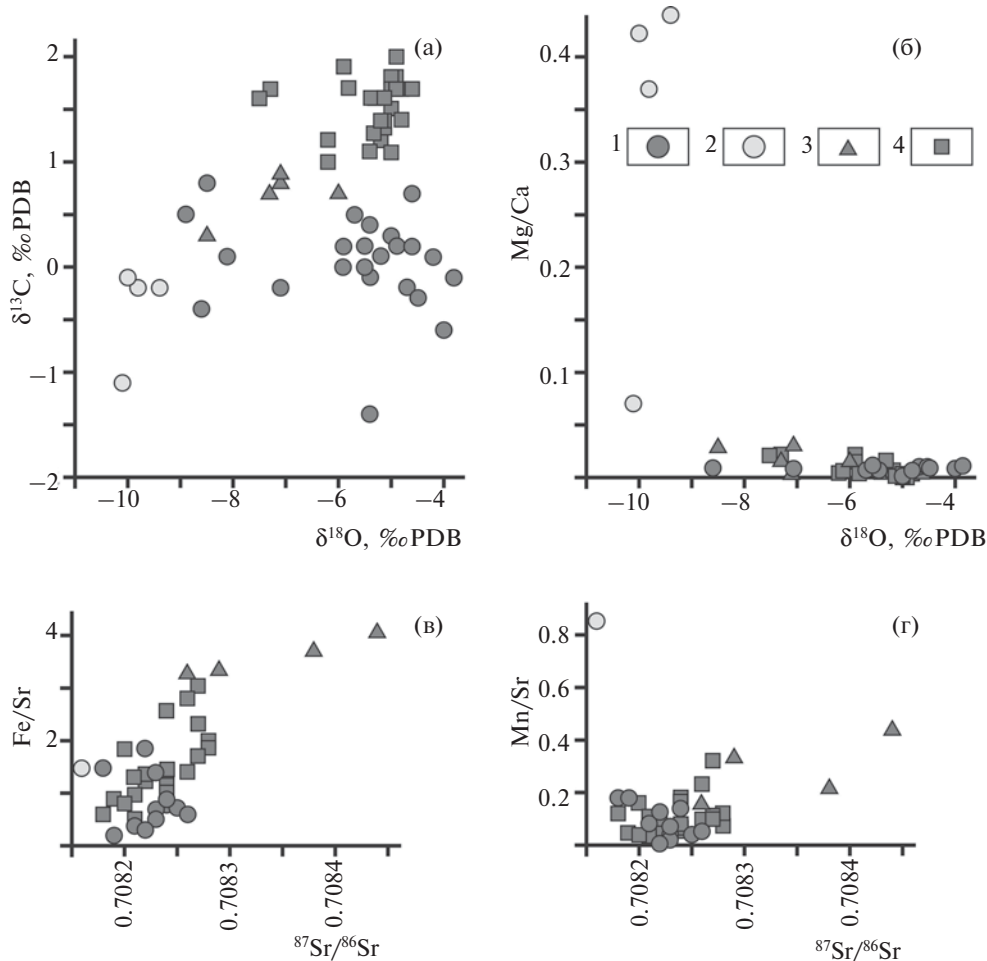


Рис. 3. Соотношения $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$, Mg/Ca – $\delta^{18}\text{O}$, Fe/Sr – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и Mn/Sr – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для карбонатных осадочных пород вороговской серии.

1 – северореченская свита, известняки; 2 – северореченская свита, доломиты; 3 – мутнинская свита; 4 – сухореченская свита.

Максимальный возраст вороговской серии определяется ее залеганием с размывом на вулканогенных породах исаковского комплекса с минимальным возрастом около 680 млн лет (Kuzmichev, Sklyarov, 2016). Что касается верхнего возрастного предела, то преобладавшая точка зрения, что сухореченская свита в ряде разрезов перекрыта вендскими отложениями чапской серии, в последнее время вызывает у нас серьезные сомнения. Так, в разрезе по р. Вороговка у устья р. М. Северная на известковистых алевролитах сухореченской свиты с угловым несогласием залегает толща желтовато-серых доломитов, ранее относимая к подъемской свите (Качевский и др., 1998; Государственная..., 2010). Однако в ней нами найдены мелкораковинные остатки *Cambrotubulus* cf. *designatus*, встречающиеся не ниже самых верхов венда, что указывает на принадлежность этих отложений не к подъемской свите нижнего венда, а к лебяжинской свите, которая относится к самым верхам венда

и нижнему кембрию (Кочнев, Карлова, 2010). Таким образом, минимально возможный возраст отложений вороговской свиты – древнее подшвы кембрия Общей стратиграфической шкалы России (ОСШР), датируемой около 535 млн лет (Стратиграфический..., 2006).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Опробование произведено в 2003 г. из стратотипических разрезов вороговской серии в нижнем течении р. Вороговка. Разрез ВК-3, в котором обнажена верхняя часть северореченской свиты и низы мутнинской свиты, расположен по левому берегу р. Вороговка в 0.8–2.3 км выше устья р. Мутнина (рис. 1). Разрез ВН-15 и надстраивающий его разрез ВН-14, в которых обнажаются верхняя часть мутнинской свиты и сухореченская свита, находятся по обоим берегам р. Вороговка от ее устья до впадения р. Сухая. Средний интервал отбора составлял

около 8–10 м в разрезе ВК-3 и 40–50 м в разрезах ВН-14 и ВН-15 (рис. 2). После визуальной отбраковки образцов из разрезов ВН-14 и ВН-15 было использовано около половины изначально отобранных проб. В коллекции из разреза ВК-3 измельченный материал был получен высверливанием из наименее измененных участков распиленного образца.

Определение содержания Са, Mg, Fe, Mn и Sr в образцах карбонатных пород северореченской свиты проведено в Лаборатории изотопно-аналитических методов Института геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН, Новосибирск), а в образцах пород мутнинской и сухореченской свит – в Ресурсном центре методов анализа состава вещества Санкт-Петербургского государственного университета (РЦ МАСВ СПбГУ, Санкт-Петербург). Образцы (100–150 мг) растворялись в 1N растворе HCl при слабом нагревании. Измерение концентраций элементов проведено на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Element II (ИГМ СО РАН) и на атомно-эмиссионном спектрометре ICP-AES-9000 (РЦ МАСВ СПбГУ). Погрешность определения 5%.

Изучение изотопного состава С и О в карбонатах проведено с использованием комплекса аппаратуры корпорации ThermoFisher, включающего масс-спектрометр Delta V Advantage и установку Gas-Bench-II (Геологический институт РАН, Москва). Пробы и стандарты КН-2, С-О-1 и NBS-19 разложены в H₃PO₄ при 50°C. Точность определения δ¹³C и δ¹⁸O составляет ±0.1‰ и ±0.2‰ соответственно.

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 определены масс-спектрометрическим методом изотопного разбавления с применением смешанного индикатора ⁸⁷Rb + ⁸⁴Sr. Изотопный состав Sr измерялся на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI. Средние значения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в стандартных образцах NIST SRM 987 и EN-1 составляли в период работы соответственно 0.710284 ± 0.000005 (2s_{средн.}, n = 38) и 0.709210 ± 0.000005 (2s_{средн.}, n = 16). Поправка на возраст измеренного отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в большинстве образцов была менее 0.00001, из-за высокой концентрации Sr и очень низкого содержания Rb. Только в восьми образцах северореченской свиты эта поправка составила 0.00001.

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 ²³⁵U + ²⁰⁸Pb (Овчинникова и др., 1998, 2012). Изотопный состав Pb и содержания U и Pb измеряли на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI с Re-лентами. Параметры изохрон вычисляли 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 измерения отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb составляли для сухореченской свиты 0.070 и 0.080 соответственно, а для северореченской свиты 0.100 и 0.117 соответственно.

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ВОРОВОГОВСКОЙ СЕРИИ

Северореченская свита. Карбонатные породы северореченской свиты представлены серыми известняками со скрытозернистой, оолитовой, биоламинитовой, реже мелко- и среднекристаллической структурой. Алюмосиликатная примесь (от 1.4 до 15.7%) представлена в основном рассеянными зернами кварца алевритовой, песчаной, иногда до гравийной размерности. Среди 18 изученных образцов (табл. 1, рис. 3б), пятнадцать являются известняками (Mg/Ca < 0.07) и три – известковистыми доломитами (Mg/Ca = 0.37–0.44). Содержание Mn в карбонатной части породы варьирует от 74 до 638 мкг/г, а Fe от 158 до 5577 мкг/г. В известняках отмечаются высокие содержания Sr от 577 до 3450 мкг/г, тогда как в известковистых доломитах количество стронция понижается до 129–197 мкг/г. Отношения Fe/Sr и Mn/Sr в большинстве известняков не превышают соответственно 1 и 0.2 (табл. 1, рис. 3в, 3г). Повышенные значения этих отношений приурочены к горизонтам доломитизации (обр. ВК-3/9, ВК-3/28 и ВК-3/29). Таким образом, основная часть образцов по геохимическим характеристикам пригодны для оценки изотопного состава С и Sr в палеобассейне (Подковыров и др., 1998; Семихатов и др., 2004; Кузнецов и др., 2014).

Изотопный состав Sr изучен в 13 образцах известняков, охватывающих практически весь карбонатный интервал в верхней части северореченской свиты. Отношение ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в этих образцах лежит в узком интервале 0.70816–0.70826

Таблица 1. Химический и С- и Sr-изотопный состав карбонатных пород вороговской серии

Номер образца	Мощность, м	% н.о.	Mg, %	Mn, мкг/г	Fe, мкг/г	Sr, мкг/г	Rb, мкг/г	Mg/Ca	Mn/Sr	Fe /Sr	$\delta^{13}\text{C}$, PDB	$\delta^{18}\text{O}$, PDB	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Сухореченская свита													
ВН-14/1	2291	13.2	0.8	310	3660	1920	0.08	0.023	0.16	1.91	1.9	–5.9	0.70820
ВН-14/3	2193	12.1	0.6	375	4870	2135	0.11	0.015	0.18	2.28	1.9	–5.9	0.70824
ВН-14/5	2139	17.2	0.8	505	4720	1564	0.09	0.022	0.32	3.02	1.7	–7.3	0.70827
ВН-14/7	2085	19.4	0.7	705	4920			0.021			1.6	–7.5	
ВН-14/11	1983	20.5	0.3	560	5950	2482	0.16	0.007	0.23	2.40	1.6	–5.3	0.70826
ВН-14/13	1905	6.8	0.1	330	1590	2656	0.07	0.003	0.12	0.60	1.7	–4.8	0.70818
ВН-14/15	1851	6.1	0.1	135	2430	2790	0.06	0.002	0.05	0.87	1.8	–4.9	0.70819
ВН-15/1	1850	13.7	0.4	205	3730			0.010			1.6	–5.4	
ВН-15/2	1826	9.5	0.3	175	3360	2745	0.13	0.008	0.06	1.22	1.7	–4.6	0.70822
ВН-15/4	1752	11.4	0.1	290	3890	2798	0.15	0.003	0.10	1.39	1.8	–5.0	0.70822
ВН-15/6	1706	11.0	0.2	190	3540	2717	0.12	0.005	0.07	1.30	1.5	–5.0	0.70821
ВН-15/10	1633	16.1	0.3	185	4970	2480	0.16	0.007	0.07	2.00	1.2	–5.2	0.70828
ВН-15/12	1571	4.7	0.1	78	1250	2390	0.08	0.002	0.03	0.52	1.4	–4.8	0.70821
ВН-15/18	1423	11.1	0.1	355	2880	2079	0.17	0.002	0.17	1.39	1.7	–5.0	0.70824
ВН-15/22	1337	9.0	0.2	215	2370	2421	0.14	0.005	0.09	0.98	1.7	–4.9	0.70821
ВН-15/26	1247	9.8	0.1	130	2850	2476	0.18	0.003	0.05	1.15	1.6	–5.1	0.70824
ВН-15/30	1155	5.2	0.1	105	2100	2650	0.06	0.002	0.04	0.79	2.0	–4.9	0.70820
ВН-15/34	1039	11.0	0.1	175	4060	2859	0.14	0.002	0.06	1.42	1.4	–5.1	0.70824
ВН-15/39	910	12.0	1.1	255	3740	2676	0.18	0.030	0.10	1.40	1.3	–5.3	0.70826
ВН-15/43	800	13.1	0.3	280	5880	2284	0.15	0.010	0.12	2.57	1.1	–5.4	0.70828
ВН-15/46	726	10.1	0.4	345	4000	2603	0.19	0.010	0.13	1.54	1.1	–5.0	0.70826
ВН-15/52	591	13.3	0.4	305	4700	2501	0.12	0.012	0.12	1.88	1.2	–6.2	0.70828
ВН-15/55	491	14.0	0.4	280	5960	2581	0.16	0.011	0.11	2.31	1.4	–5.2	0.70827
ВН-15/58	389	9.5	0.3	150	2370	2380	0.13	0.008	0.06	1.00	1.7	–5.8	0.70824
ВН-15/59	349	14.8	0.3	230	3750	2229	0.19	0.009	0.10	1.68	1.0	–6.2	0.70827
Мутнинская свита													
ВН-15/61	297	30.6	0.9	335	5530	1493	0.42	0.030	0.22	3.70	0.8	–7.1	0.70838
ВН-15/64	223	19.1	0.5	353	6710	2060	0.28	0.015	0.17	3.26	0.7	–6.0	0.70826
ВН-15/69	123	21.3	0.5	770	7730	2327	0.22	0.014	0.33	3.32	0.7	–7.3	0.70829
ВН-15/71	58	32.7	0.1	450	9920			0.003			0.9	–7.1	
ВН-15/73	1	28.7	0.9	725	6860	1679	0.26	0.029	0.43	4.09	0.3	–8.5	0.70844
Северореченская свита													
ВК-3/30	303	5.0	3.1	306	523	362	0.20	0.070	0.85	1.44	–1.1	–10.1	0.70816
ВК-3/29	297	2.8	12.5	612	730	129	0.32	0.441	4.74	5.67	–0.2	–9.4	–
ВК-3/28	291	3.3	11.3	310	1128	197	0.23	0.373	1.57	5.73	–0.2	–9.8	–
ВК-3/26	281		–	–	–	–	–	–	–	–	0.1	–8.1	–
ВК-3/25	276		–	–	–	–	–	–	–	–	–1.4	–5.4	–
ВК-3/24	272	4.2	0.49	210	1093	1382	0.78	0.010	0.15	0.79	–0.6	–4.0	0.70824
ВК-3/23	267		–	–	–	–	–	–	–	–	0.5	–8.9	–
ВК-3/22	260	7.3	0.23	122	1996	3000	0.79	0.005	0.04	0.67	0.3	–5.0	0.70823

Таблица 1. Окончание

Номер образца	Мощность, м	% н.о.	Mg, %	Mn, мкг/г	Fe, мкг/г	Sr, мкг/г	Rb, мкг/г	Mg/Ca	Mn/Sr	Fe/Sr	$\delta^{13}\text{C}$, PDB	$\delta^{18}\text{O}$, PDB	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
ВК-3/20	244	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.2	−4.9	
ВК-3/19	232	12.9	0.36	114	2365	3237	1.66	0.008	0.04	0.73	0.5	−5.7	0.70825
ВК-3/18	224	7.4	0.34	128	1162	1936	0.63	0.007	0.07	0.60	−0.1	−5.4	0.70826
ВК-3/17	215	4.7	0.32	153	728	1880	0.15	0.007	0.08	0.39	−0.2	−4.7	0.70821
ВК-3/16	202	4.7	0.29	242	2435	2870	0.82	0.006	0.08	0.85	0.2	−4.6	0.70824
ВК-3/15	189	3.8	0.26	74	1586	3340	0.51	0.005	0.02	0.47	0.2	−5.9	0.70823
ВК-3/14	176	15.7	0.40	309	5577	3019	1.51	0.008	0.10	1.85	0.0	−5.5	0.70822
ВК-3/13	164	11.8	0.34	202	3860	2760	0.62	0.007	0.07	1.40	0.2	−5.5	0.70823
ВК-3/12	151	10.1	0.48	638	5024	3450	0.45	0.010	0.18	1.46	−0.2	−7.1	0.70818
ВК-3/10	104	1.4	0.53	130	158	743	0.08	0.010	0.18	0.21	−0.4	−8.6	0.70819
ВК-3/9	91	1.7	12.1	463	1024	130	0.22	0.424	3.56	7.88	−0.1	−10.0	—
ВК-3/8	81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.1	−4.2	—
ВК-3/7	69	6.3	0.67	228	1733	577	1.83	0.014	0.40	3.00	−0.1	−3.8	—
ВК-3/6	57	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0	−5.9	—
ВК-3/5	48	9.2	0.48	429	2589	1387	1.43	0.010	0.31	1.87	−0.3	−4.5	—
ВК-3/4	40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.1	−5.2	—
ВК-3/3	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.8	−8.5	—
ВК-3/2	24	4.8	0.20	47	1276	4420	0.59	0.004	0.01	0.29	0.7	−4.6	0.70822
ВК-3/1	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.4	−5.4	—

Примечание. Положение образцов указано от основания разреза ВК-3 для северореченской свиты и от основания разреза ВН-15 для верхней части мутнинской свиты и сухореченской свиты.

(рис. 3в, 3г). Значения $\delta^{13}\text{C}$ в карбонатных породах северореченской свиты также варьируют в узком диапазоне от -1.4 до $+0.8\text{‰}$ V-PDB и в целом близки к 0 (рис. 2, 3а). В доломитизированных образцах значения $\delta^{13}\text{C}$ практически не отличаются от таковых в соседних известняках. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в большинстве образцов лежат в пределах -5‰ – -8‰ V-PDB, при отклонениях до -10.1 и до -3.8‰ . Пониженные значения $\delta^{18}\text{O}$ отчетливо тяготеют к доломитизированным образцам (рис. 3б).

Сухореченская и мутнинская свиты. Карбонатные породы этого стратиграфического интервала представлены серыми и коричнево-серыми известняками с примесью зерен кварца и обломков пород песчано-алевритовой размерности. Известняки мелкозернистые, слоистые, биоламинитовые, иногда обломочные. Все 30 изученных образцов представлены известняками ($\text{Mg}/\text{Ca} = 0.002\text{--}0.03$). Содержание нерастворимого остатка высокое и составляет $4.7\text{--}20.5\%$ для сухореченской свиты и $19.1\text{--}32.7\%$ для мутнинской свиты (табл. 1, рис. 3б). Концентрация Mn в известняках варьирует от 78 до 770 мкг/г.

Содержание Fe ($1250\text{--}9920$ мкг/г) в известняках коррелирует с количеством нерастворимого остатка. Это указывает на присутствие железа в оксидно-гидроксидной примеси. Содержания Sr в известняках ($1493\text{--}2859$ мкг/г) являются очень высокими в сравнении с докембрийскими осадочными карбонатными породами (Kuznetsov et al., 2013, 2017). Отношение Mn/Sr в известняках сухореченской свиты лежит в интервале $0.03\text{--}0.32$, а в известняках мутнинской свиты равно $0.17\text{--}0.43$ (табл. 1, рис. 3г). Отношение Fe/Sr в известняках сухореченской свиты составляет $0.5\text{--}3.0$, а в известняках мутнинской свиты $3.3\text{--}4.1$ (рис. 3в). Среди изученных известняков, двадцать пять образцов в полной мере удовлетворяют критериям сохранности C- и Sr-изотопных систем (Кузнецов и др., 2014).

Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в наименее измененных образцах сухореченской свиты варьирует от 0.70818 до 0.70828 , а в одном образце из мутнинской свиты это отношение равно 0.70826 (рис. 2, 3в, 3г). Значения $\delta^{13}\text{C}$ в известняках сухореченской свиты лежат в узком интервале между $+1.0$ и $+2.0\text{‰}$, что на $1\text{--}2\text{‰}$ выше, чем

в известняках нижележащей северореченской свиты (рис. 2, 3а). На границе сухореченской и мутнинской свит наблюдается отчетливое понижение $\delta^{13}\text{C}$ до $+0.7\%$. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в известняках сухореченской и мутнинской свит лежат в интервале от -8.5 до -4.6% V-PDB, составляя в среднем около -6% .

Таким образом, геохимические и изотопные характеристики карбонатных пород вороговской серии в сочетании с седиментологическими наблюдениями дают основание считать, что эти отложения формировались в обстановках прямой связи с открытым морем при солёности, близкой к нормальной. Позднедиагенетическая перекристаллизация пород, за исключением отдельных интервалов доломитизации в нижней части разреза, не привела к изменению первичных С- и Sr-изотопных характеристик осадочных карбонатных пород. Значения $\delta^{13}\text{C}$ в изученной осадочной последовательности лежат в пределах $-1.4...+2.0\%$ с отчетливым возрастанием вверх по разрезу (рис. 2). Изотопные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в трех свитах вороговской серии очень выдержанны и варьируют в достаточно узком диапазоне $0.70816-0.70828$.

Pb–Pb ВОЗРАСТ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ВОРОГОВСКОЙ СЕРИИ

Изучение U–Pb систематики известняков проведено в восьми наименее измененных образцах из северореченской свиты и в девяти образцах из сухореченской свиты. Выбранные образцы удовлетворяют строгим геохимическим критериям ($\text{Mn}/\text{Sr} < 0.2$, $\text{Fe}/\text{Sr} < 3$), указывающим на отсутствие эпигенетической перекристаллизации известняков (Кузнецов и др., 2005, 2008). Концентрации Pb в образцах лежат в интервале $0.17-2.01$ мкг/г, а U – $0.15-0.27$ мкг/г (табл. 2), что согласуется с содержанием этих элементов в докембрийских осадочных карбонатных породах (Овчинникова и др., 1998, 2012; Семихатов и др., 2003; Kuznetsov et al., 2013). Отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в известняках северореченской свиты незначительно выше, чем в известняках сухореченской свиты – $21.632-38.283$ против $19.807-25.555$. В отличие от этого, отношение $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в образцах северореченской свиты ниже, чем в образцах сухореченской свиты – $38.015-38.961$ против $38.833-40.044$. Это отражает небольшое различие в геохимических условиях формирования карбонатных осадков двух свит, что, в свою очередь, подтверждает разное время осадконакопления.

Рассчитанное значение возраста для известняков северореченской свиты равно 580 ± 40 млн лет (СКВО = 1.4), а для известняков сухореченской свиты 565 ± 90 млн лет

Таблица 2. U–Pb данные для карбонатных пород вороговской серии

Номер образца	U, мкг/г	Pb, мкг/г	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Сухореченская свита					
ВН-15/2	–	0.691	23.651	15.899	39.669
ВН-15/6	–	0.759	22.532	15.842	40.044
ВН-15/12	0.270	0.723	21.933	15.800	38.833
ВН-15/18	0.186	1.043	22.220	15.808	38.592
ВН-15/22	0.224	1.338	21.248	15.759	38.861
ВН-15/30	0.196	0.498	25.555	16.022	39.127
ВН-15/34	0.209	1.295	20.767	15.738	39.015
ВН-15/39	0.257	2.010	19.807	15.681	39.079
ВН-15/58	–	0.768	23.113	15.868	39.218
Северореченская свита					
ВК-3/2	0.234	0.362	38.283	16.728	38.961
ВК-3/12	0.192	0.466	25.190	15.948	38.015
ВК-3/13	0.148	0.666	24.278	15.883	38.660
ВК-3/14	0.207	1.119	21.632	15.737	38.222
ВК-3/18	–	–	33.233	16.408	38.715
ВК-3/19	0.175	0.642	26.805	16.038	38.661
ВК-3/22	0.234	0.171	38.028	16.709	38.892
ВК-3/24	–	–	28.421	16.155	38.236

Примечание. Средние погрешности измерения отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в серии соответствующих образцов и стандарта NIST SRM 981 для сухореченской свиты равны 0.070 и 0.080 соответственно, а для северореченской – 0.100 и 0.117 соответственно.

(СКВО = 1.1). Высокая погрешность, особенно в случае пород сухореченской свиты, вызвана небольшой вариацией отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в образцах (рис. 4).

ВОЗРАСТНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ВОРОГОВСКОЙ СЕРИИ

Полученные Pb–Pb возрасты осадочных известняков северореченской и сухореченской свит являются первыми прямыми датировками отложений вороговской серии. Даже с учетом ошибки определений, эти возрасты 580 ± 40 и 565 ± 90 млн лет исключают отнесение вороговской серии к рифею ОСШР (Семихатов и др., 2015) и криогению МСШ, верхняя возрастная граница которого составляет 635 млн лет. Неопределенность геохронологического возраста серии может быть существенно снижена на

основании С- и Sr-изотопной хемотратиграфии карбонатных пород и с учетом возраста перекрывающих и подстилающих толщ.

Вороговская серия в нескольких разрезах с угловым несогласием перекрывается лебяжинской свитой, резко отличающейся своим доломитовым составом. Нами это несогласие наблюдалось в среднем течении р. Вороговка у устья р. Мал. Северная (Кочнев, Карлова, 2010). В приустьевой части р. Вороговка по правобережью р. Енисей угловое несогласие между вороговской серией и лебяжинской свитой описано

М.А. Семихатовым (1962). В более южных разрезах, по рекам Исаковка, Столбовая и Нижняя Сурниха доломиты лебяжинской свиты залегают на различных уровнях вороговской серии (сухореченская и мутнинская свиты) без углового несогласия, но с несомненным перерывом (Семихатов, 1962; Сараев, 2015). Возраст основания лебяжинской свиты установлен по находкам в ее базальных слоях мелкораковинных остатков, встречающихся не ниже зоны *Pugella antiqua* самой верхней части венда (Кочнев, Карлова, 2010; Гражданкин и др., 2015). Основание лебяжинской свиты и ее возрастных аналогов хорошо прослеживается вдоль всей южной окраины Сибирского кратона как уровень, с которого карбонатное осадконакопление становится преобладающим (Решения..., 1983; Сараев, 2015). Возраст этой границы близок к подошве томского яруса нижнего кембрия ОСШР и, скорее всего, не превышает 530–535 млн лет. Таким образом, отчетливая смена типа осадконакопления, сопровождающаяся несогласием, указывает на крупный перерыв между накоплением вороговской серии и началом формирования базальных отложений нижнего кембрия.

Большинство карбонатных разрезов венда (эдиакария) как Сибирского кратона, так и других регионов мира характеризуются крупными аномалиями изотопного состава углерода в карбонатных осадочных породах (Семихатов и др., 2004; Покровский и др., 2006, 2015; Halverson et al., 2010; Saltzman, Thomas, 2012). В частности, интервал 565–580 млн лет, к которому тяготеют полученные Pb–Pb возрасты вороговской серии, включает крупнейшую глобальную негативную С-изотопную аномалию Шурам-Вонока (Halverson et al., 2010). Околонулевые или слабо положительные значения $\delta^{13}\text{C}$ более характерны для нижнего кембрия (рис. 5). Однако слабо положительные значения $\delta^{13}\text{C}$, зафиксированные в вороговской серии, наблюдаются и около 600 млн лет назад, а также непосредственно выше и ниже аномалии Шурам-Вонока, соответственно в интервалах 550–560 и 570–580 млн лет. Похожие значения $\delta^{13}\text{C}$ наблюдаются в кембрии, но помещение в этот стратиграфический интервал вороговских карбонатов противоречит данным о достаточно длительном перерыве между лебяжинской свитой нижнего кембрия и верхними свитами вороговской серии.

Отсутствие крупных позитивных и негативных аномалий $\delta^{13}\text{C}$ в разрезе вороговской серии в сочетании со свидетельствами высокой интенсивности осадконакопления приводит к важному выводу о том, что длительность формирования этой осадочной толщи не превышала 10–15 млн лет. В противном случае С-изотопные события венда, зафиксированные в разрезах юго-восточ-

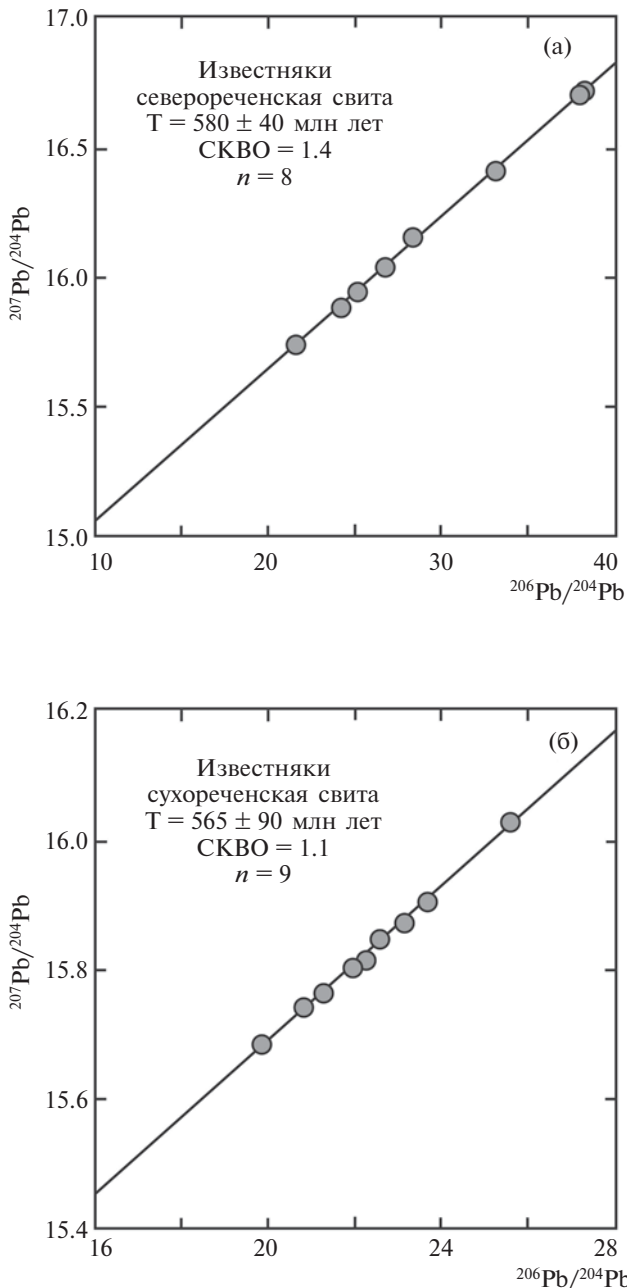


Рис. 4. График отношений $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для известняков северореченской (а) и сухореченской (б) свит.

ной части Сибирского кратона (Семихатов и др., 2004; Покровский и др., 2006, 2015), также имели бы отражение в отложениях вороговской серии, которая формировалась в обстановках открытого шельфа и в связи с Мировым океаном.

Другой возможный вариант интерпретации С-изотопных данных заключается в том, что нижнюю часть разреза вороговской серии можно принять как лежащую ниже С-изотопной аномалии Шурам-Вонока, а верхнюю часть в объеме сухореченской свиты отнести к уровню, лежащему выше этой аномалии. В этом случае длительность накопления всей серии может достигать 40–50 млн лет. Однако против этого свидетельствуют данные стронциевой изотопной хемотратиграфии. Значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ около 0.7081–0.7083 наблюдаются в эдиакарских (вендских) морских карбонатных осадочных породах моложе 580 млн лет в нескольких возрастных интервалах. В частности, такие значения могут встречаться как в средней части эдиакария (около 580 млн лет), так и в конце эдиакарского периода (560–541 млн лет). Кроме того, близкие к полученным отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ известны в томмотском ярусе ОСШР или в ярусе 2 (Stage 2) МСШ (Семихатов и др., 2003; Покровский и др., 2006; Halverson et al., 2010; Kuznetsov et al., 2013, 2017). В более молодых морских карбонатных осадках отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ возрастает до 0.7083–0.7090 (Кузнецов и др., 2014) и понижается до 0.7081–0.7082 только в позднем ордовике. Ордовикские отложения на западе Сибирской платформы хо-

рошо изучены, отделены от докембрийских отложений мощной (до нескольких километров) осадочной последовательностью кембрия, поэтому корреляцию с ними вороговской серии можно исключить (Государственная..., 2010). Точно так же приходится исключить томмотский возраст вороговской серии, поскольку этот стратиграфический уровень на северо-западе Енисейского кряжа представлен лебяжинской свитой (см. выше). Таким образом, анализ Sr-хемотратиграфических данных показывает, что наиболее вероятный возраст отложений вороговской серии может быть оценен как пограничный между ранним и поздним вендом ОСШР – 580–555 млн лет. Однако с учетом С-изотопных данных оценка может быть сдвинута к верхней части этого интервала – 560–555 млн лет.

Среди других данных о возрасте вороговской серии необходимо упомянуть находки органостенных микрофосилий в тонкообломочных отложениях средней части северореченской свиты и верхней части мутнинской свиты, а также находки известковых водорослей и возможной скелетной проблематики в верхней части северореченской свиты (разрез ВК-3) (Постников и др., 2008). Большинство из указанных форм микрофосилий являются проходящими из рифея, однако часть из них появляется в позднем венде, что не противоречит хемотратиграфическим и геохронологическим выводам. То же самое можно сказать о микробиалитах и пробле-

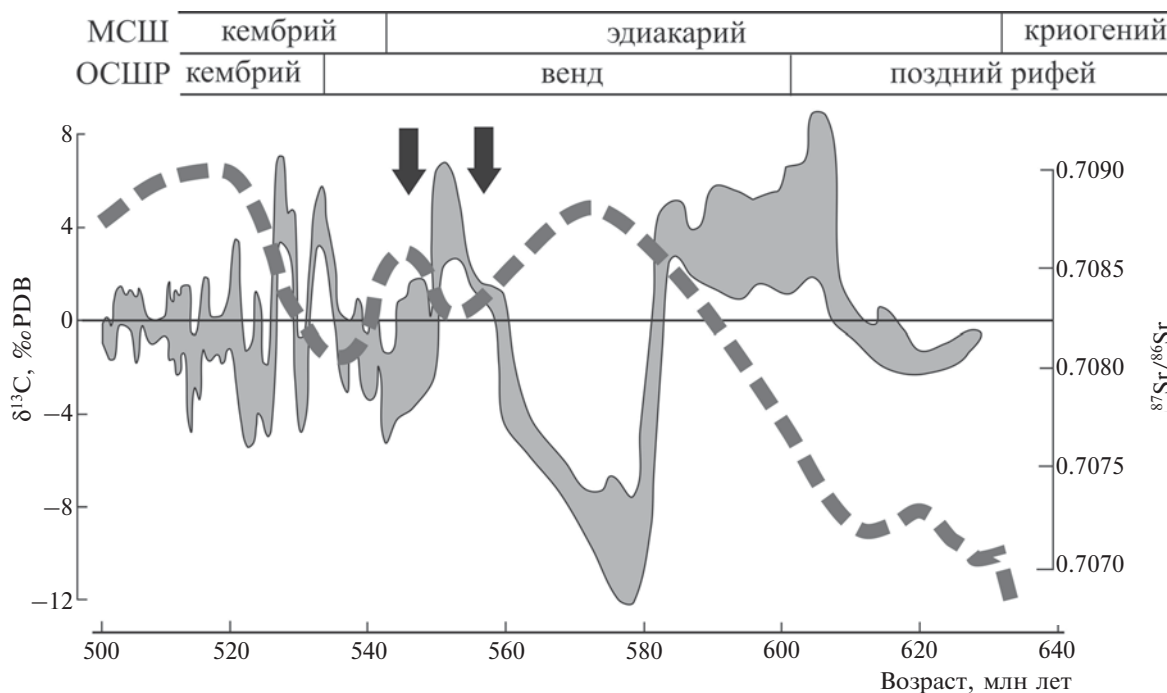


Рис. 5. Оценка возраста вороговской серии по изотопно-геохимическим данным.

Серое поле — средние значения $\delta^{13}\text{C}$ по (Saltzman, Thomas, 2012). Пунктирная линия — средние значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ по (Кузнецов и др., 2014). Стрелками показаны возможные положения вороговской серии на сводных кривых.

матичных скелетных остатках (Семихатов, 1962; Постников и др., 2008), поскольку среди них нет таких, которые однозначно ограничивали бы возраст вмещающих отложений немакит-далдынским горизонтом или кембрием ОСШР.

Полученные нами оценки возраста вороговской серии согласуются с результатами датирования обломочных цирконов. Так, возраст самого молодого кластера из базальных слоев северореченской свиты составляет 584 ± 3 млн лет (Вишневская и др., 2017). Таким образом, по всему комплексу геологических данных возраст вороговской серии может быть ограничен интервалом 580–555 млн лет. Отложения серии формировались в позднем венде после оледенения Гаскье (580 млн лет назад) и после позднеэдиакарского С-изотопного события Шурам-Вонока. Более вероятно, что отложение всей серии происходило между 550 и 560 млн лет назад, а длительность ее формирования не превышала 10–15 млн лет.

РЕГИОНАЛЬНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ И ТЕКТОНИКА

В пределах Сибирской платформы отложения с возрастом около 550–560 млн лет с определенной степенью условности относятся к тирскому региональному горизонту (Стратиграфия..., 2005) либо соответствуют перерыву между тирским

и даниловским горизонтами внутренних районов платформы. Карбонатные отложения улунтуйской свиты байкальской серии Прибайкалья, Pb–Pb возраст которых равен 560 ± 30 млн лет (Kuznetsov et al., 2013), не являются стратиграфическими аналогами вороговской серии, поскольку отличаются по составу, мощности и высоким значениям $\delta^{13}\text{C}$ (+5...+7‰; Хабаров, Пономарчук, 2005). Вероятными возрастными аналогами вороговской серии могут являться старореченская свита Прианабарья (около 560 млн лет; Горохов и др., 2010) или усть-юдомская свита Учуро-Майского региона (550 ± 20 млн лет; Семихатов и др., 2003). Однако значения $\delta^{13}\text{C}$ в карбонатных породах названных свит заметно ниже (–4...0‰; Kaufman et al., 1996; Семихатов и др., 2004), чем в вороговской серии. Корреляция старореченской свиты с тирским горизонтом на основе их положения в разрезе и близкого состава практически не вызывает сомнений (Стратиграфия..., 2005; Голубкова и др., 2010). Тирский горизонт на Сибирской платформе отвечает эпохе низкого стояния уровня моря. В это время во внутренних ее частях появились изолированные бассейны с повышенной соленостью и отложением эвапоритов (Мельников, 2018), одновременно в краевых прогибах на юге накапливались мощные терригенные толщи за счет активного сноса кластического материала



Рис. 6. Схема корреляции вендских отложений Енисейского края.

Chn – чингасанская серия, Форт. – фортунский ярус, Кембр. – кембрий, Нижн. – нижний, Нем.-далд. – немакит-далдынский ярус, Томм. – томмотский ярус. Названия свит приведены без слова “свита”.

с внешних орогенов вдоль юго-западной окраины Сибирского кратона (Верниковский и др., 2009). Подобные обстановки осадконакопления отличаются от реконструированных для воровговской серии (Sovetov, Le Heron, 2016), которая отлагалась в условиях нормальной солености и более высоких скоростей седиментации.

Возможная корреляция воровговской серии с другими вендскими осадочными последовательностями краевых прогибов юго-запада Сибирской платформы (рис. 6) показывает, что, несмотря на их соседство в современной тектонической структуре Енисейского кряжа, эти толщи формировались в осадочных бассейнах, слабо или не сообщавшихся между собой на ранних стадиях заполнения. Сопоставление воровговской серии с чингасанской серией Тейско-Чапского прогиба, предлагавшееся ранее (Хоментовский, 2007; Государственная..., 2010), вряд ли может быть приемлемо, так как чингасанская серия по геохронологическим и изотопно-геохимическим данным имеет возраст не моложе 670–750 млн лет (Ножкин и др., 2007; Покровский и др., 2012; Priyatkina et al., 2016). Подъемская свита чапской серии характеризуется умеренно отрицательными значениями $\delta^{13}\text{C}$ и минимальным отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.7076, позволяющими относить ее к раннему венду (Покровский и др., 2012), что также древнее воровговской серии. В расположенном южнее Нижнеангарском прогибе на нижнем протерозое–рифее с несогласием залегает тасеевская серия, которая, судя по минимальным возрастам обломочных цирконов, моложе 600 млн лет (Вишневецкая и др., 2015). В средней части тасеевской серии из прослоев осадочных биоламинитовых доломитов получены значения $\delta^{13}\text{C}$ $-8\text{...}-12\text{‰}$, позволяющие сопоставлять этот уровень с жуинской серией Патомского прогиба и с глобальной негативной С-изотопной аномалией Шурам-Вонока (Кочнев и др., 2016). И в Тейско-Чапском, и в Нижнеангарском прогибах осадконакопление, в отличие от Воровговского авлакогена, продолжалось относительно непрерывно вплоть до начала кембрия (островная, иркинеевская, лебяжинская свиты). Таким образом, развитие осадочных систем в краевых прогибах в основном определялось локальной тектонической обстановкой и лишь в периоды высокого стояния уровня моря – влиянием эвстатических колебаний.

В свете полученных свидетельств поздневендского возраста воровговской серии не исключено, что ее возможные стратиграфические и фациальные аналоги вблизи западной окраины Сибирского кратона следует искать на юго-востоке Западно-Сибирской плиты (рис. 6). Например, в Предьенисейском осадочном бассейне описаны мощные, преимущественно

карбонатные толщи позднего венда и кембрия (Конторович и др., 2008; Гражданкин и др., 2015). В частности, на западном продолжении Воровговского прогиба в скв. Восток-3 к позднему венду отнесены преимущественно доломитовые пойгинская и котоджинская свиты, содержащие в том числе сходный с воровговской серией комплекс микробиацитов (Гражданкин и др., 2015). С другой стороны, отложения котоджинской и особенно пойгинской свит формировались в обстановках стабильного шельфа и передового склона на удалении от источников силикокластического материала, основным поставщиком которого в это время мог служить Енисейский кряж. Ввиду отсутствия опубликованных данных по изотопным характеристикам вендских карбонатных отложений, вскрытых в скв. Восток-3, более детальная корреляция этих толщ с воровговской серией северо-запада Енисейского кряжа пока не представляется возможной.

ВЫВОДЫ

1. Большинство карбонатных пород северореченской, мутнинской и сухореченской свит представлено известняками, а терригенная примесь состоит из обломков кварца и полевых шпатов. Высокие содержания стронция и низкие отношения Mn/Sr и Fe/Sr, отсутствие корреляции между $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ указывают на то, что карбонаты не имеют значимых эпигенетических изменений и пригодны для оценки первичных изотопных характеристик осадочного бассейна.

2. Значение $\delta^{13}\text{C}$ в известняках верхней части северореченской свиты колеблется между -1‰ и $+1\text{‰}$ V-PDB. В нижней части мутнинской свиты значения $\delta^{13}\text{C}$ составляют $+0.3\text{...}+1\text{‰}$, несколько возрастая в сухореченской свите до $+1.7\text{...}+2\text{‰}$. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в известняках воровговской серии изменяются в пределах $-10\text{...}-3\text{‰}$ V-PDB, что характерно для слабоизмененных карбонатных осадочных пород позднего докембрия. Отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в известняках воровговской серии лежат в узких пределах 0.70816–0.70826.

3. Первые прямые Pb–Pb определения возраста известняков воровговской серии показывают, что возраст карбонатных осадков северореченской свиты равен 580 ± 40 млн лет, а сухореченской свиты 565 ± 90 млн лет. Даже с учетом аналитической погрешности воровговская серия относится к венду ОСШР или к эдиакарию МСШ.

4. Полученные геохронологические данные в сочетании с С- и Sr- хемотратиграфическими исследованиями и с анализом геологических данных позволяют сделать вывод о том, что от-

ложения вороговской серии сформировались за относительно короткое время, не превышающее 10–15 млн лет. Наиболее вероятно, что формирование этой осадочной последовательности происходило 555–560 млн лет назад, что отвечает позднему венду ОСШР.

5. Вороговский прогиб формировался как авлакоген, осадочные системы которого имели ряд особенностей: большая мощность, высокие скорости седиментации, преимущественно известняковый состав карбонатных пород и нормальная соленость. Это своеобразие коренным образом отличает Вороговский прогиб от разновозрастных краевых прогибов юго-западной и южной окраины Сибирской платформы и указывает на существенное влияние локальных тектонических условий на строение и состав развитых здесь осадочных последовательностей, по сравнению с эвстатическими колебаниями.

Источники финансирования. Тематика исследований скоординирована с Программой фундаментальных научных исследований РАН № 19 (темы №№ 0153-2018-0009, 0135-2016-0017 и 331-2016-021). Изучение изотопного состава Sr и определение Pb–Pb изохронного возраста карбонатных пород проведено при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00418. Изучение изотопного состава C и O осуществлялось в соответствии с планом НИР ГИН РАН и при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00487. Геохимическое изучение карбонатных пород проведено при поддержке гранта РНФ № 17-17-01241. Химический анализ карбонатных пород проведен с использованием оборудования РЦ МАСВ Научного парка СПбГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Матушкин Н.Ю. и др.* 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.
- Вишневская И.А., Летникова Е.Ф., Прошенкин А.И. и др.* Изотопная стратиграфия карбонатных пород шунгарской свиты Енисейского кряжа и U–Pb датирование детритовых цирконов из подстилающих и перекрывающих отложений // *Эволюция осадочных процессов в истории Земли. Материалы 8-го Всероссийского литологического совещания (Москва, 27–30 октября 2015 г.)*. М.: РГУ нефти и газа им. М.И. Губкина, 2015. Т. II. С. 34–36.
- Вишневская И.А., Летникова Е.Ф., Прошенкин А.И. и др.* Вороговская серия венда Енисейского кряжа: хемостратиграфия и данные U–Pb-датирования детритовых цирконов // *Докл. АН*. 2017. Т. 476. № 3. С. 311–315.
- Голубкова Е.Ю., Раевская Е.Г., Кузнецов А.Б.* Нижневендские комплексы микрофоссилий Восточной Сибири в решении стратиграфических проблем региона // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2010. Т. 18. № 4. С. 3–27.
- Горохов И.М., Семихатов М.А., Турченко Т.Л. и др.* Rb–Sr геохронология вендских аргиллитов старореченской свиты (Анабарский массив, Северная Сибирь) // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2010. Т. 18. № 5. С. 16–27.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист Р-46 – Северо-Енисейский. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 470 с.
- Гражданкин Д.В., Конторович А.Э., Конторович В.А. и др.* Венд Предьенейской осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири) // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56. № 4. С. 718–734.
- Качевский Л.К., Качевская Г.И., Грабовская Ж.М. и др.* Геологическая карта Енисейского кряжа масштаба 1:500 000. Ред. Мкртычян А.К., Шерман М.Л. Красноярск: Красноярскгеолсъемка, 1998.
- Конторович А.Э., Варламов А.И., Гражданкин Д.В. и др.* Разрез венда восточной части Западно-Сибирской плиты (по материалам бурения параметрической скважины Восток-3) // *Геология и геофизика*. 2008. Т. 49. № 12. С. 1238–1247.
- Кочнев Б.Б., Карлова Г.А.* Новые данные по биостратиграфии немакит-далдынского яруса венда юга Сибирской платформы // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2010. Т. 18. № 5. С. 28–41.
- Кочнев Б.Б., Покровский Б.Г., Кузнецов А.Б.* Изотопно-геохимическая характеристика, корреляция и возраст чистяковской свиты венда юга Енисейского кряжа // *Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения. Материалы 3-й Международной научной конференции*. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2016. С. 109–110.
- Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Крупенин М.Т. и др.* Формирование и преобразование карбонатных пород и сидеритовых руд бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал): Sr-изотопная характеристика и Pb–Pb возраст // *Литология и полезн. ископаемые*. 2005. № 3. С. 227–249.
- Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Семихатов М.А. и др.* Sr изотопная характеристика и Pb–Pb возраст карбонатных пород саткинской свиты, нижнерифейская бурзьянская 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 (рифей и венда) // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2014. Т. 22. № 6. С. 3–25.
- Кузьмичев А.Б., Падерин И.П., Антонов А.В.* Позднерифейский Борисихинский офиолитовый массив

(Енисейский кряж): U–Pb возраст и обстановка формирования // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 12. С. 1175–1188.

Лиханов И.И., Ножкин А.Д. Геохимия, обстановки формирования и возраст метавулканитов Исаковского террейна Енисейского кряжа – индикаторы ранних этапов эволюции Палеоазиатского океана // Геохимия. 2018. № 4. С. 308–320.

Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (стратиграфия, история развития). Изд. 2-е, доп. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2018. 177 с.

Николаев И.Г. Годовой отчет о геологических исследованиях в северо-западной части Енисейского горного округа за 1923 г. // Изв. Сиб. отд. Геол. комитета. 1924. Т. 3. Вып. 5.

Ножкин А.Д., Постников А.А., Наговицин К.Е. и др. Чингасанская серия неопротерозоя Енисейского кряжа: новые данные о возрасте и условиях формирования // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 12. С. 1307–1320.

Подковыров В.Н., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б. и др. Изотопный состав карбонатного углерода в стратотипе верхнего рифея (каратавская серия Южного Урала) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1998. Т. 6. № 4. С. 3–19.

Покровский Б.Г., Буякайте М.И. Геохимия изотопов С, О и Sr в неопротерозойских карбонатах юго-западной части Патомского палеобассейна, юг Средней Сибири // Литология и полезн. ископаемые. 2015. № 2. С. 159–186.

Покровский Б.Г., Мележик В.А., Буякайте М.И. Изотопный состав С, О, Sr и S в позднекембрийских отложениях патомского комплекса, Центральная Сибирь. Сообщение 1. Результаты, изотопная стратиграфия и проблемы датирования // Литология и полезн. ископаемые. 2006. № 5. С. 1–26.

Покровский Б.Г., Буякайте М.И., Кокин О.В. Геохимия изотопов С, О, Sr и хемотратиграфия неопротерозойских отложений севера Енисейского кряжа // Литология и полезн. ископаемые. 2012. № 2. С. 197–220.

Постников А.А., Терлеев А.А., Кузнецов А.Б. и др. Вороговская серия Енисейского кряжа (новые геологические и изотопно-геохимические данные) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского складчатого пояса (от океана к континенту). Материалы совещания. Вып. 6. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. Т. 2. С. 53–55.

Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Часть 1 (верхний протерозой и нижний палеозой). Новосибирск: СНИИГГиМС, 1983. 215 с.

Сараев С.В. Литолого-фациальная характеристика усольской свиты (нижний кембрий) и ее возрастных аналогов Предъенисейского осадочного бассейна Западной Сибири // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1173–1188.

Семихатов М.А. Рифей и нижний кембрий Енисейского кряжа. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 242 с.

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

Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Подковыров В.Н. и др. 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 (рифей и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 16–27.

Советов Ю.К., Благовидов В.В. Шельфовое осадконакопление на поздней стадии развития Вороговского прогиба (Енисейский кряж) // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 4. С. 45–51.

Стратиграфический кодекс России. Издание 3-е. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. 96 с.

Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. Ред. Мельников Н.В. Новосибирск: Гео, 2005. 428 с.

Овчинникова Г.В., Васильева И.М., Семихатов М.А. и др. U–Pb систематика карбонатных пород протерозоя: инзерская свита стратотипа верхнего рифея (Южный Урал) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1998. Т. 6. № 4. С. 20–31.

Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Васильева И.М. и др. 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.

Хабаров Е.М., Пономарчук В.А. Изотопы углерода в верхнерифейских отложениях байкальской серии Западного Прибайкалья: стратиграфические следствия // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 10. С. 1019–1037.

Хоментовский В.В. Верхний рифей Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 9. С. 921–933.

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

Halverson G.P., Wade B.P., Hurtgen M.T., Barovich K.M. Neoproterozoic chemostratigraphy // Precambrian Res. 2010. V. 182. P. 337–350.

Kaufman A.J., Knoll A.H., Semikhatov M.A. et al. Integrated chronostratigraphy of Proterozoic–Cambrian boundary beds in the western Anabar region, northern Siberia // Geol. Magazine. 1996. V. 133. P. 509–533.

Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V. The Precambrian of Transangaria, Yenisey Ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, Grenville-age orogen, or reworked margin of the Siberian Craton? // J. Asian Earth Sci. 2016. V. 115. P. 419–441.

Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M. et al. 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. et al. 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. Spec. Publ. 2003. № 4. 72 p.

Priyatkina N., Khudoley A.K., Collins W.J. et al. Detrital zircon record of Meso- and Neoproterozoic sedimentary basins in northern part of the Siberian Craton: characterizing buried crust of the basement // *Precambrian Res.* 2016. V. 285. P. 21–38.

Saltzman M.R., Thomas E. Carbon isotope stratigraphy // *The Geologic Time Scale.* V. 1. Elsevier, 2012. P. 207–232.

Sovetov J.K., Le Heron D. Birth and evolution of a Cryogenian basin: glaciation, rifting and sedimentation in the Vorogovka Basin, Siberia // *Sedimentology.* 2016. V. 63. P. 498–522.

Рецензенты В.П. Ковач, В.Н. Сергеев

C- AND Sr-ISOTOPE CHEMOSTRATIGRAPHY AND Pb–Pb AGE OF CARBONACEOUS SEDIMENTS OF THE VOROGOVKA GROUP (NEOPROTEROZOIC), NORTHWESTERN YENISEI RIDGE

B. B. Kochnev^{1, 2}, A. B. Kuznetsov³, B. G. Pokrovsky⁴, D. R. Sitkina³, Z. B. Smirnova³

¹ *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

² *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

³ *Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint-Petersburg, Russia*

⁴ *Geological Institute RAS, Moscow, Russia*

C- and Sr-isotope record is received and Pb–Pb age is determined from carbonaceous sedimentary rocks of Vorogovka Group in the type section at Vorogovka River, northwestern Yenisei Ridge. The sequence of the group consists of the Severnaya Rechka, Mutnina and Sukhaya Rechka Formations that fill a large trough, and lithological and textural features indicate the rapid sedimentation. Most carbonaceous rocks are presented by limestones with low Fe/Sr and Mn/Sr relations and average $\delta^{18}\text{O}$ value $-6.0 \pm 1.6\text{‰}$ V-PDB indicating the well-preserved isotope systems of the rocks. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relations and $\delta^{13}\text{C}$ values vary within narrow limits as 0.70816–0.70826 and $-1.4...+0.8\text{‰}$ for upper Severnaya Rechka limestones and as 0.70818–0.70829 and $+1.0...+2.0\text{‰}$ for Sukhaya Rechka limestones, respectively. Pb–Pb isochronous age of carbonaceous rocks of the Severnaya Rechka Formation is 580 ± 40 Ma (MSWD = 1.4), and of Sukhaya Rechka Formation is 565 ± 90 Ma (MSWD = 1.1). Judging from chemostratigraphical and isotope-geochronological data, the forming of limestone sediments of Vorogovka Group could occur at 580–550 Ma ago, that corresponds to the Late Vendian or the Late Ediacaran. The endurance of accumulation of Vorogovka Group likely not exceeded 10–15 Myr. Vorogovka Trough differed in the type of sedimentation from other Late Vendian marginal troughs at the southwestern Siberian Platform, and formed independently from them.

Keywords: Vendian, carbonaceous rocks, C- and Sr-isotope chemostratigraphy, Pb–Pb geochronology, correlation, Yenisei Ridge.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-592X27597-112>