



AGE OF THE KINTEREP FORMATION OF THE NORTHWESTERN SALAIR: CHEMOSTRATIGRAPHY AND U-Pb ZIRCON DATING

N.I. Vetrova ¹✉, E.V. Vetrov ¹, E.F. Letnikova ¹, N.G. Soloshenko ²

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Academician Vonsovsky St, Ekaterinburg 620016, Russia

ABSTRACT. A comprehensive study of the stratotype section of the Kinterep formation of the North-Western Salair was carried out, including geochemical and isotope (Sr, C, O) studies of carbonate rocks, and U-Pb dating (LA-ICP-MS) of igneous zircon crystals from tuffites. The studied carbonate rocks are pure limestones with Mg/Ca less than 0.007 and a low proportion of insoluble residue (average 5 %). Kinterep limestones are characterized by $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ values from 19.8 to 23.8 ‰ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values from -0.7 to +0.9. The Sr isotope composition in limestones of the Kinterep formation varies in a narrow range of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values between 0.70851 and 0.70859. Comparison of the obtained isotopic characteristics ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) of Kinterep formation limestones with the generalized global $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variation curve and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values in the pale-ocean suggests two equally probable interpretations of the time of accumulation of Kinterep formation limestones: 550–540 and 525–510 Ma. U-Pb dating of magmatic zircon crystals from tuffite, which forms an interlayer among limestones of the Kinterep formation, showed the age at the boundary of ~515 Ma. Thus, using a combination of isotope (Sr, C) chemostratigraphy of carbonate rocks and U-Pb dating of igneous zircon crystals from tuffites syngenetic to limestones, the age limit of 525–510 Ma was established for the time of the formation of the Kinterep formation of the Salair basin. Carbonate rocks of similar age and similar features of the isotopic composition are known in neighbouring areas (for example, the Kuznetsk Alatau) and in regions of the Siberian Platform and microcontinents of Central Asia (Tuva-Mongolian and Dzabkhan) spatially distant from the Salair basin.

KEYWORDS: U-Pb dating; zircon; chemostratigraphy; isotopy (Sr, C, O); Cambrian; Central Asian foldbelt; Salair

FUNDING: The research was financially supported by Russian Science Foundation project 21-77-00022 (geochemical, geochronological and Sr-isotope analysis), as a part of the state assignment of the IGM SB RAS (C-O isotope study).

SHORT COMMUNICATION

Received: December 6, 2021

Revised: December 27, 2021

Accepted: December 30, 2021

Correspondence: Natalia I. Vetrova, pisareva@igm.nsc.ru

FOR CITATION: Vetrova N.I., Vetrov E.V., Letnikova E.F., Soloshenko N.G., 2022. Age of the Kinterep Formation of the Northwestern Salair: Chemostratigraphy and U-Pb Zircon Dating. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0597. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0597

ВОЗРАСТ КИНТЕРЕПСКОЙ СВИТЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО САЛАИРА: ДАННЫЕ ХЕМОСТРАТИГРАФИИ И U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНА

Н.И. Ветрова¹, Е.В. Ветров¹, Е.Ф. Летникова¹, Н.Г. Солошенко²

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведено комплексное изучение стратотипического разреза кинтерепской свиты Северо-Западного Салаира, включающее геохимические, изотопно-геохимические (Sr, C, O) исследования карбонатных пород и U-Pb датирование (LA-ICP-MS) магматогенных кристаллов циркона из туффитов. Изученные карбонатные породы представлены чистыми известняками с величиной Mg/Ca менее 0.007 и низкой долей нерастворимого остатка (в среднем 5 %). Кинтерепские известняки характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ от 19.8 до 23.8 ‰ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ от -0.7 до +0.9. Изотопный состав Sr в известняках кинтерепской свиты варьируется в узком диапазоне значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ между 0.70851 и 0.70859. Сопоставление полученных изотопных характеристик ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) известняков кинтерепской свиты с обобщенной мировой кривой вариации $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ в палеоокеане предполагает два равновероятных варианта интерпретации времени накопления известняков кинтерепской свиты: 550–540 и 525–510 млн лет. U-Pb датирование кристаллов магматогенного циркона из туффита, слагающего прослой среди известняков кинтерепской свиты, показало возраст формирования на рубеже ~515 млн лет. Таким образом, с помощью комбинации методов изотопной (Sr, C) хемотратиграфии карбонатных пород и U-Pb датирования кристаллов магматогенного циркона из сингенетичных известнякам туффитов установлены ограничения на время формирования кинтерепской свиты Салаирского бассейна 525–510 млн лет. Карбонатные породы, имеющие схожий возраст и аналогичные особенности изотопного состава, известны в соседних районах (например, Кузнецкий Алатау) и в пространственно отдаленных от Салаирского бассейна регионах Сибирской платформы и микроконтинентов Центральной Азии (Тувинно-Монгольского и Дзабханского).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: U-Pb датирование; циркон; хемотратиграфия; изотопия (Sr, C, O); кембрий; Центрально-Азиатский складчатый пояс; Салаир

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-00022 (геохимические, геохронологические и изотопные Sr-исследования) и в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (изотопные C-O исследования).

1. ВВЕДЕНИЕ

Объект исследований – кинтерепская свита, представляет наиболее древние образования северо-западной части Салаира и является одним из эталонов карбонатных разрезов Алтае-Саянской складчатой области [Decisions..., 1983]. В геологической истории Алтае-Саянской складчатой области эпоха устойчивого карбонатонакопления соответствует позднекембрийско-кембрийскому времени. Формирование мощных карбонатных толщ происходило в условиях шельфов пассивных окраин Сибирского континента, Тувинно-Монгольского микроконтинента, карбонатных построек более мелких микроконтинентов главным образом в вендское время. На рубеже венда и раннего кембрия произошла структурная перестройка, связанная с заложением островодужной системы и формированием мощных вулканогенно-осадочных толщ [Babin, Shokalsky, 2017]. В то же время были обособлены осадочные бассейны с унаследованным терригенно-карбонатным типом седиментации. Поскольку эти бассейны были сопряжены с магматическими островодужными структурами,

они характеризуются разнообразным литологическим составом и более сложной фациальной зональностью. В отличие от вендского этапа осадконакопления, в кембрии получили массовое развитие терригенные, вулканогенно-осадочные и продуктивные фосфатные толщи, в карбонатных осадках появляются примеси вулканического материала.

Кинтерепская свита сложена преимущественно серыми рифогенными и темно-серыми тонкоплитчатыми известняками с примесью вулканогенно-осадочного материала, прослоями туфов и кремнисто-глинистых сланцев [State Geological Map..., 2005]. В настоящее время ее возраст основывается на палеонтологических определениях – в известняках верхней части свиты известны находки археоциат плохой сохранности. Фациальный аналог кинтерепской свиты в юго-восточной части Салаира (гавриловская свита) включает многочисленные фаунистические остатки – микрофитоциты *Osagia mongolica* Vol., *O. kuvaika* Jaksch., *Gleocapsella gincingeri* Posp.; водоросли *Epiphyton* sp., *Razumovskia* sp., *Girvanella* sp., *Renalcis* sp., *Proaulopora* sp.; крустификаты

Stromatactis palaeozoicus Posp. и редкие фрагменты археоциат *Robustocyathus ? sp.* [Geological Map..., 1968]. Характер взаимоотношения с перекрывающими отложениями до сих пор не имеет однозначной трактовки. С одной стороны, считается, что на карбонатных породах кинтерепской свиты согласно залегают вулканогенные образования печеркинской свиты [Roslyakov et al., 2001], с другой – предполагается, что кинтерепские известняки связаны постепенными переходами с печеркинскими вулканитами по латерали и вместе образуют единый фациальный ряд [State Geological Map..., 2007, 2015]. Изотопный возраст печеркинской свиты также не подтвержден современными геохронологическими данными. Вендская K-Ar датировка по валовому составу породы 572±15 млн лет [Shcherbakov et al.,

1987], полученная для вулканитов печеркинской свиты из стратотипического разреза, требует подтверждения другими геохронологическими методами.

В настоящей работе мы представляем результаты геохимических, изотопно-геохимических (Sr, C, O) исследований карбонатных пород кинтерепской свиты северо-западной части Салаирского бассейна и U-Pb изотопного датирования магматогенных кристаллов циркона из туффитов, залегающих среди этих карбонатных пород, с целью уточнения возраста формирования свиты.

2. МЕТОДЫ

Содержания Ca, Mg, Mn, Fe и Sr определены с помощью атомно-абсорбционного анализа на приборе Thermo

Таблица 1. Результаты U-Pb датирования цирконов (проба HB20-19)

Table 1. Results of U-Pb dating of zircons (sample HB20-19)

№ точки	Th/U	Изотопные отношения						Возраст, млн лет						D, %		
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	σ		конкорд	σ
1	0.28	0.0564	0.0042	0.642	0.048	0.0821	0.0017	504	15	509	5	467	83	508	5	-1
2	0.44	0.0533	0.0045	0.613	0.050	0.0829	0.0017	486	16	513	5	341	96	511	5	-5
3	0.29	0.0557	0.0044	0.643	0.050	0.0835	0.0017	504	16	517	5	439	88	516	5	-2
4	0.30	0.0593	0.0050	0.677	0.052	0.0830	0.0019	525	16	514	6	577	92	516	5	2
5	0.27	0.0555	0.0035	0.645	0.041	0.0834	0.0017	505	13	516	5	431	70	515	5	-2
6	0.20	0.0573	0.0024	0.644	0.029	0.0814	0.0015	505	9	504	4	502	46	505	4	0
7	0.29	0.0552	0.0051	0.618	0.053	0.0830	0.0023	489	17	514	7	419	103	510	6	-5
8	0.54	0.0559	0.0022	0.655	0.026	0.0830	0.0011	512	8	514	3	447	44	514	3	0
9	0.26	0.0574	0.0027	0.680	0.032	0.0852	0.0012	527	10	527	4	506	52	527	3	0
10	0.21	0.0559	0.0053	0.618	0.055	0.0833	0.0024	489	17	516	7	447	105	511	6	-5
11	0.25	0.0544	0.0028	0.640	0.034	0.0835	0.0013	502	11	517	4	387	58	516	4	-3
12	0.37	0.0559	0.0027	0.646	0.031	0.0828	0.0012	506	10	513	4	447	54	512	3	-1
13	0.25	0.0592	0.0054	0.666	0.056	0.0819	0.0022	518	17	507	7	574	99	509	6	2
14	0.20	0.0539	0.0036	0.625	0.043	0.0836	0.0016	493	13	518	5	366	75	516	5	-5
15	0.28	0.0542	0.0051	0.620	0.056	0.0830	0.0018	490	18	514	5	378	106	512	5	-5
16	0.37	0.0581	0.0057	0.665	0.064	0.0824	0.0021	518	20	510	6	533	107	511	6	1
17	0.30	0.0567	0.0050	0.645	0.054	0.0829	0.0018	505	17	513	5	479	97	513	5	-2
18	0.40	0.0548	0.0021	0.653	0.025	0.0851	0.0009	510	8	526	3	403	43	525	3	-3
19	0.27	0.0552	0.0041	0.662	0.051	0.0840	0.0016	516	16	520	5	419	83	520	5	-1
20	0.25	0.0566	0.0058	0.659	0.067	0.0841	0.0024	514	21	521	7	475	113	520	7	-1
21	0.24	0.0578	0.0040	0.675	0.047	0.0840	0.0015	524	14	520	4	521	76	520	4	1
22	0.23	0.0585	0.0034	0.673	0.037	0.0844	0.0018	523	11	522	5	548	64	522	5	0
23	0.22	0.0553	0.0035	0.639	0.038	0.0820	0.0017	502	12	508	5	423	71	507	5	-1

Примечание. Погрешности единичных анализов изотопных отношений приведены на уровне 2σ, погрешности вычисленных возрастов – на уровне σ. Расчет ²⁰⁷Pb/²³⁵U, ²⁰⁶Pb/²³⁸U, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb и конкордантных значений возраста выполнен по изотопным отношениям ²⁰⁷Pb/²³⁵U, ²⁰⁶Pb/²³⁸U, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb с помощью программы IsoplotR [Vermeesch, 2018]. Дискордантность (D, %) рассчитана по формуле ((²⁰⁷Pb/²³⁵U возраст / ²⁰⁶Pb/²³⁸U возраст - 1)·100).

Note. The errors in single analyzes of isotope ratios are given at the 2σ level, and the errors in the calculated ages are at the 1σ level. The ²⁰⁷Pb/²³⁵U, ²⁰⁶Pb/²³⁸U, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb and concordant age values were calculated from the isotopic ratios ²⁰⁷Pb/²³⁵U, ²⁰⁶Pb/²³⁸U, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, respectively, using the IsoplotR program [Vermeesch, 2018]. Discordance (D, %) was calculated using the formula ((²⁰⁷Pb/²³⁵U age / ²⁰⁶Pb/²³⁸U age - 1)·100).

Scientific SOLAAR AA Spectrometr в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования СО РАН» (г. Новосибирск). Погрешность измерений составила не более 5 %. Измерение изотопного состава С и О выполнено методом проточной масс-спектрометрии при постоянном потоке Не с помощью масс-спектрометра Finnigan MAT – 253 и линии пробоподготовки – Gas Bench II в данном ЦКП. Измерения содержаний изотопного состава Sr выполнены на многоколлекторном масс-спектрометре TritonPlus в ЦКП «Геоаналитик» (г. Екатеринбург, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН).

U-Pb-изотопное датирование зерен магматогенно-циркона выполнено в Центре геотермохронологии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета на квадрупольном масс-спектрометре с ионизацией в индуктивно связанной плазме ThermoScientific iCAP Q, соединенном с системой лазерной абляции на основе эксимерного лазера (длина волны 193 нм) Analyte Excite (Teledyne Cetac Technologies). Погрешности единичных анализов (отношений, возрастов) приведены на уровне 2σ (табл. 1).

3. ОСНОВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изученный стратотипический разрез кинтерепской свиты расположен в районе пос. Кинтереп (от $54^{\circ}29'150''$ с.ш., $83^{\circ}58'995''$ в.д. до $54^{\circ}29'091''$ с.ш., $83^{\circ}59'102''$ в.д.), где свита обнажена в виде полосы северо-восточного простирания в ядре Романовской антиклинали, представляющей собой линейную складку с падением крыльев $20-30^{\circ}$ и осложненной складками более мелких порядков.

Для геохимических и изотопно-геохимических (Sr, С, О) исследований опробован непрерывный разрез (21 проба) (рис. 1) свежих известняков без кальцитовых прожилков и признаков мраморизации мощностью ~ 160 м. На протяжении опробованного разреза породы сохраняли свое залегание, не были нарушены разрывными дислокациями и мелкой складчатостью. Такая стратегия пробоотбора карбонатных толщ, испытавших неоднократные эпизоды постседиментационных деформаций, позволяет проследить изменение изотопно-геохимических особенностей карбонатных пород в пределах одной толщи, сформированной в ходе единого цикла осадконакопления, и избежать повторения (т.н. сдвоенного разреза). Известняки представляют собой серые и темно-серые массивные однородные породы с раковистым изломом, скрытокристаллической структурой, без вторичных изменений.

Результаты геохимических исследований карбонатных пород кинтерепской свиты показали, что они представлены чистыми известняками – Mg/Ca составляет менее 0.007 и лишь в двух пробах – 0.012 и 0.017. Доля нерастворимого остатка в 19 пробах не превышает 12 % и в среднем составляет 5 %. Наибольшее содержание алюмосиликатного вещества 33 и 43 %

выявлено в двух пробах, представляющих собой известняки с примесью туфогенного материала. Концентрации Mn в пробах с долей нерастворимого остатка, не превышающей 12 %, находятся в интервале от 30 до 280 г/т. Содержание Fe варьируется в широких пределах – от 630 до 18000 г/т. В нижней части разреза наблюдается снижение концентраций с 7300 до 2900 г/т с последующим ростом этих значений до 10200 г/т и дальнейшим плавным снижением до 2300 г/т. Максимальные концентрации железа (18000 и 16100 г/т) и марганца (960 и 1730 г/т) выявлены в двух пробах средней части разреза с наибольшей долей нерастворимого остатка. Содержания Sr варьируются от 2700 до 6300 г/т. Пробы с терригенной примесью более 10 % были исключены из дальнейших изотопно-геохимических исследований.

Известняки кинтерепской свиты с долей нерастворимого остатка до 10 % характеризуются низкими значениями Mn/Sr – от 0.01 до 0.10, Fe/Sr варьируется между 0.13 и 2.30, что указывает на высокую степень сохранности Rb-Sr изотопной системы и ее пригодность для исследований изотопного состава стронция. Для удаления вторичных карбонатных фаз пробы были подготовлены по стандартной методике селективного растворения [Gorokhov et al., 1995; Li et al., 2011]. Измерения изотопного состава Sr наименее измененных образцов карбонатных пород кинтерепской свиты показали значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в узком диапазоне от 0.70851 до 0.70859. Полученные значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ варьируются от 19.8 до 23.8 ‰. Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ известняков кинтерепской свиты меняется в диапазоне от -0.7 до $+0.9$ с плавным переходом от отрицательных значений внизу разреза к положительным вверху. Отсутствие корреляции между содержанием Sr и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($R^2=0.18$) указывает на сохранность Sr-изотопной системы, что также подтверждается отсутствием корреляции между значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и Mn/Sr ($R^2=-0.21$) и между содержанием Sr и значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ($R^2=0.09$). Отсутствие корреляции между значениями $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ($R^2=-0.37$) также говорит о сохранности изотопной системы.

Сопоставление полученных изотопных характеристик ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) карбонатных пород кинтерепской свиты с обобщенной кривой вариации $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ в палеоокеане [Halverson et al., 2010; Melezhik et al., 2015] показало, что полученные характеристики ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0.70851 до 0.70859, значения $\delta^{13}\text{C}$ от -0.7 до $+0.9$ ‰) соответствуют двум равновероятным интервалам времени накопления: 550–540 и 525–510 млн лет. Аналогичные изотопные характеристики известны в карбонатных породах янгудской свиты Северо-Муйской глыбы: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0.70814 до 0.70879, значения $\delta^{13}\text{C}$ от -0.4 до $+1.9$ ‰ с интервалом накопления 525–520 млн лет [Vishnevskaya et al., 2018]; чехла Тувино-Монгольского микроконтинента (верхняя часть хужиртайской и нюргатинской свит боксонской серии): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0.70830 до 0.70873, значения $\delta^{13}\text{C}$ от -0.9 до -0.1 ‰ с интервалом накопления

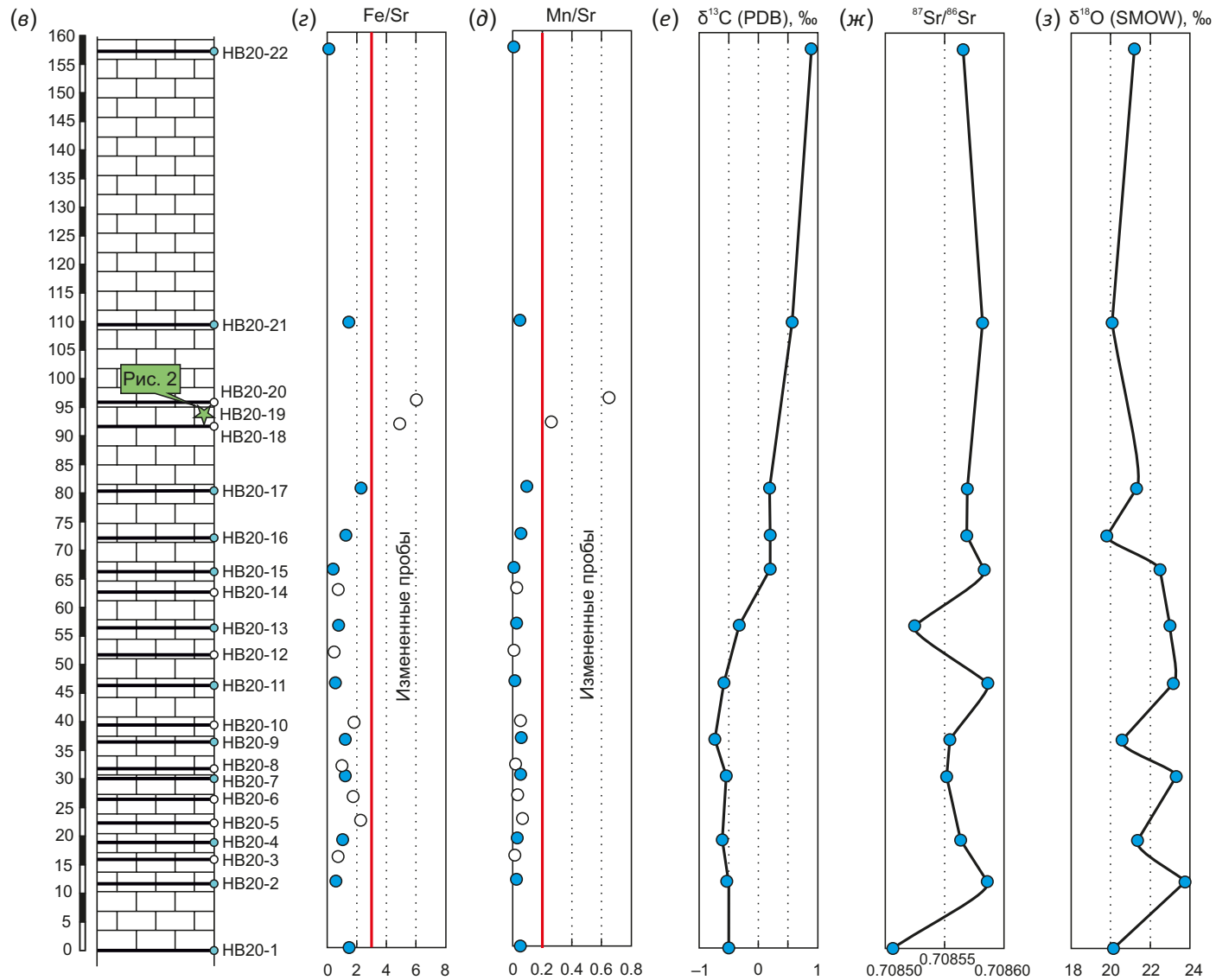
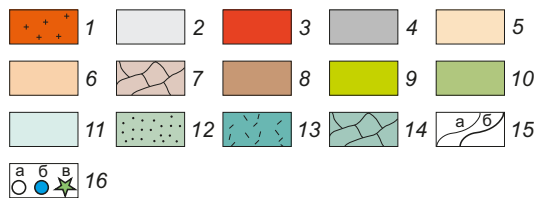
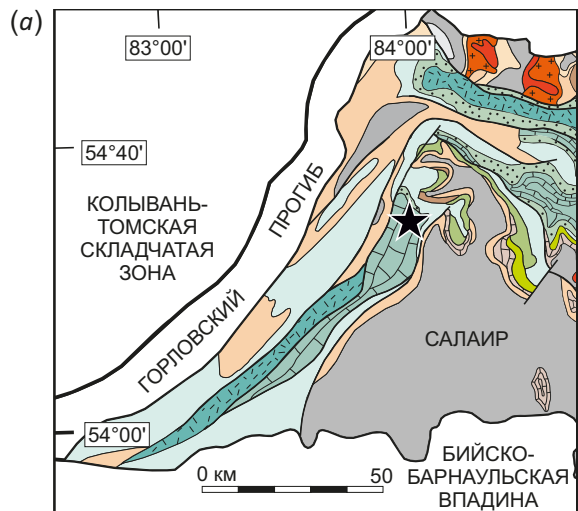


Рис. 1. Схема геологического строения Салаира (а), положение Салаира на упрощенной тектонической схеме Северной Евразии (б), схематический литологический разрез кинтерепской свиты с указанием положения мест отбора проб (в) и результаты геохимического, изотопно-геохимического изучения карбонатных пород (известняков) кинтерепской свиты (з-з).

Положение объекта исследования на схемах (а) и (б) показано черной звездочкой. Красной линией на фрагментах (з) и (д) отмечены предельные значения критериев сохранности известняков. 1 – пермско-триасовые гранитоиды, 2 – отложения среднего – верхнего карбона (нижебалахонская подсерия), 3 – средне- и позднекарбонные гранитоиды, 4 – отложения верхнего девона – нижнего карбона (мозжухинская группа свит), 5 – отложения верхнего девона (пачинская, укропская свиты), 6 – отложения среднего девона (хмелевская свита, соболевско-сафроновская группа свит), 7 – отложения нижнего – среднего девона (бердско-майская группа свит), 8 – отложения нижнего девона (томско-заводская и теленгитская серии), 9 – отложения нижнего силура (серебренниковская серия), 10 – отложения нижнего – среднего ордовика (илокарская серия), 11 – отложения среднего кембрия – раннего ордовика (зелено-фиолетовая серия), 12 – терригенные отложения раннего кембрия (суенгенско-анчешевская группа свит), 13 – вулканогенные образования раннего кембрия (печеркинская свита), 14 – карбонатные отложения раннего кембрия (кинтерепско-гавриловская группа свит), 15а – геологические границы тел, 15б – разрывные нарушения; 16 – места отбора проб на геохимические (а), изотопно-геохимические (б) и геохронологические (в) исследования.

Fig. 1. Scheme of geological structure of the Salair (a), the Salair's position on the simplified tectonic scheme of Northern Eurasia (b), schematic lithological section of the Kinterep formation showing the sampling locations (e) and results of geochemical, and isotope study of carbonate rocks (limestones) of the Kinterep formation (z-z).

The position of the studied object is shown with a black asterisk on (a) and (b). The red line marks the limiting values of the criteria for the preservation of limestones on fragments (z) and (d). 1 – Permian-Triassic granitoids, 2 – deposits of the Middle – Upper Carboniferous (Lower Balakhon Subseries), 3 – Middle- and Late Carboniferous granitoids, 4 – deposits of the Upper Devonian – Lower Carboniferous deposits (Mozzhukha Group), 5 – Upper Devonian (Pachinskaya, Ukropskaya Formations), 6 – Middle Devonian deposits (Khmelevskaya suite, Sobolevsko-Safronovskaya Group), 7 – Lower – Middle Devonian deposits (Berdsko-Maya Group), 8 – Lower Devonian deposits (Tomsk-Zavodskaya and Telengitskaya series), 9 – Lower Silurian deposits (Serebrennikovskaya series), 10 – Lower – Middle Ordovician deposits (Ilokar series), 11 – Middle Cambrian – Early Ordovician deposits (green-violet series), 12 – Early Cambrian terrigenous deposits (Suengensko-Ancheshevskaya Group), 13 – Early Cambrian volcanic formations (Pecherkinskaya Formation), 14 – Early Cambrian carbonate deposits (kinterepsko-Gavrillovskaya Group), 15a – geological boundaries of bodies, 15b – faults; 16 – sampling locations for geochemical (a), isotope (b) and geochronological (v) studies.

от 540 до 520 млн лет [Vishnevskaya, Letnikova, 2013]; в Кузнецком Алатау (3-я пачка сорнинской свиты енисейской серии): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в интервале от 0.70848 до 0.70852, но более высокие значения $\delta^{13}\text{C}$ – от +3 до +4 ‰ с интервалом накопления 525–517 млн лет [Letnikova et al., 2011]; в Уринском поднятии (толбачинской и мачинской свитах): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0.70854 до 0.70855 [Gorokhov et al., 1995]; для карбонатных пород чехла Сибирского кратона $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0.70846 до 0.70856, значения $\delta^{13}\text{C}$ от –1.8 до –0.3 ‰ [Derry et al., 1994], а также для баянкольской свиты чехла Дзабханского микроконтинента характерны $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0.70847 до 0.70858, значения $\delta^{13}\text{C}$ от –3.9 до +5.1 ‰ и интервал осадконакопления составляет 550–520 млн лет [Brasier et al., 1996].

Для уточнения возраста формирования кинтерепской свиты проведены геохронологические U-Pb исследования магматогенных кристаллов циркона из прослоя псаммитовых туффитов (проба НВ20-19, 54°29'109" с.ш., 83°59'053" в.д.) верхней части изученного карбонатного разреза. Туффиты представляют собой светло-серые породы с полосчатой текстурой (рис. 2, а, б), на 80–85 % состоят из вулканогенного материала и на 15–20 % – из карбонатного цемента. Среди вулканогенного материала выделяются идиоморфные кристаллы кварца и альбита размерностью до 1 мм. Переход от чистых известняков к туффитам прослежен по постепенному увеличению частиц пеплового материала, и наоборот, выше по разрезу смена туффитов известняками прослежена по уменьшению размера алюмосиликатных частиц. Накопление туфогенного материала происходило

синхронно с накоплением карбонатных осадков, и датирование акцессорных минералов из туффитов позволяет инструментально обосновать изотопный возраст карбонатных пород.

Проанализированные зерна циркона из пробы НВ20-19 представляют собой светло-коричневые преимущественно идиоморфные изометричные и, реже, призматические кристаллы длиной от 100 до 190 мкм с коэффициентом удлинения в среднем от 1.2 до 2.2, без трещин и включений. В катодолюминесцентном изображении кристаллы циркона имеют умеренное до высокого свечение. Осцилляторная зональность проявлена не во всех зернах (рис. 2, в). Циркон характеризуется Th/U в диапазоне от 0.20 до 0.54, что в совокупности с их морфологическими особенностями указывает на их магматическое происхождение. Для 22 кристаллов циркона выполнено 23 измерения (табл. 1), в одном из кристаллов проанализирована центральная и краевая части зерна (точки 7 и 8), в остальных – только краевая часть. Единичные измерения показали диапазон конкордантных возрастов от 505 до 527 млн лет с погрешностью от 3 до 7 млн лет.

Конкордантный возраст, полученный по всем 23 измерениям, составил 516.0 ± 0.9 млн лет (СКВО=10). Средний возраст, рассчитанный по 21 измерению, показал схожий результат – 513.6 ± 1.0 млн лет. Два анализа не были учтены при расчете средневзвешенного значения возраста, поскольку оказались несколько древнее, чем основная популяция. Кривая плотности вероятности иллюстрирует пик на ~513 млн лет (рис. 2, г). С учетом магматического происхождения проанализированных

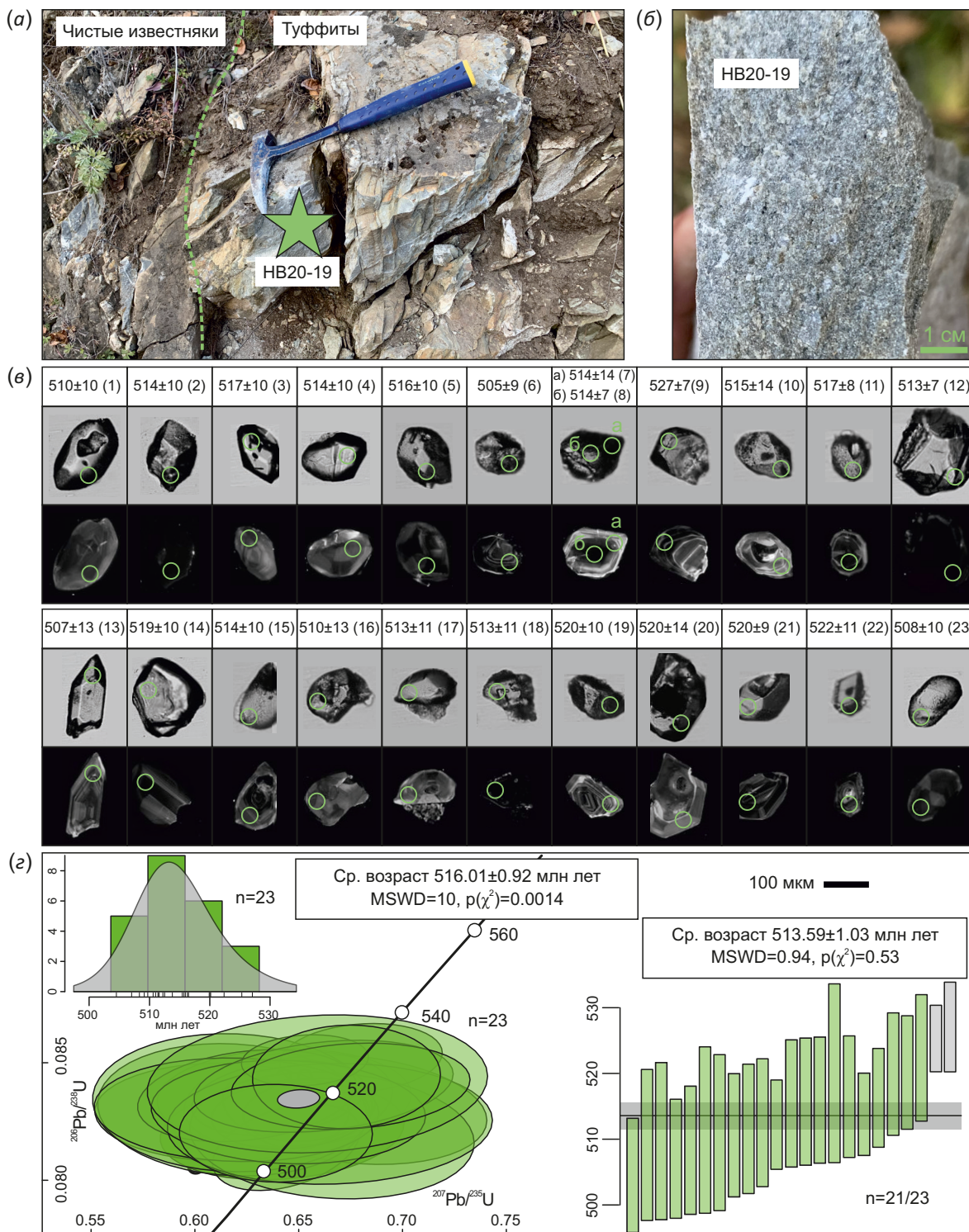


Рис. 2. Фото обнажения туффитов среди чистых известняков кинтерепской свиты (а), фото образца туффитов, для кристаллов магматогенного циркона которых проведены геохронологические исследования (б) и результаты геохронологического исследования зерен магматогенного циркона (в, г).

Фото кристаллов циркона (в) на сером фоне – в отраженном свете, на черном фоне – КЛ-изображения. Зеленые круги показывают место измерения. Единичные конкордантные возрасты и их погрешности представлены в миллионах лет, номера измерения согласуются с табл. 1. График с конкордией, гистограмма, кривая плотности вероятности и средневзвешенное значение возраста (з) рассчитаны с помощью программы IsoplotR [Vermeesch, 2018].

Fig. 2. Photo of a tuffite outcrop among the pure limestones of the Kinterep Formation (a), photo of a tuffite sample for which geochronological studies were carried out (b), and the results of a geochronological study of zircons (v, g).

Photo of zircons (v) on a gray background – in reflected light, on a black background – CL images. The green circles show the measurement location. Single-grain concordant ages and their errors are presented in Ma, the measurement numbers are consistent with Table 1. The plot with concordia, histogram, and mean age (z) measurements were carried out using the IsoplotR program [Vermeesch, 2018].

зерен циркона полученная датировка ~515 млн лет отражает раннекембрийское время формирования туфогенного материала, обнаруженного среди известняков кинтерепской свиты.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе исследования материалы, включая геологические и петрографические данные, и результаты изотопных исследований указывают на синхронность образования туфогенного материала с отложением карбонатных осадков. Вероятнее всего, кинтерепская свита накапливалась в условиях задугового бассейна одновременно с формированием островодужных вулканитов печеркинской свиты. В таком случае кинтерепские известняки и печеркинские вулканиты следует рассматривать как единый фациальный ряд. Учитывая раннекембрийский (~515 млн лет) U-Pb возраст туфитов, установленный хемотратиграфическим методом интервал карбоната накопления 525–510 млн лет можно считать наиболее вероятным для времени формирования кинтерепской свиты Северо-Западно-го Салаира.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Н.Б. Кузнецову и анонимному рецензенту за их ценные замечания к представленным материалам, которые, несомненно, позволили улучшить конечный вариант статьи.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Babin G.A., Shokalsky S.P., 2017. Major Geological Features of the Altai-Sayan Folded Region (Tectonic Zoning, Stratigraphy, Magmatism, Geological Evolution). *Geology and Mineral Resources of Siberia (S)*, 19–34 (in Russian) [Бабин Г.А., Шокальский С.П. Основные черты геологического строения Алтае-Саянской складчатой области (тектоническое районирование, стратиграфия, магматизм, история геологического развития) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2017. № S. С. 19–37].

Brasier M.D., Shields G., Kuleshov V.N., Zhegallo E.A., 1996. Integrated Chemo- and Biostratigraphic Calibration of Early Animal Evolution: Neoproterozoic – Early Cambrian of Southwest Mongolia. *Geological Magazine* 133 (4), 445–485. <https://doi.org/10.1017/S0016756800007603>.

Decisions of the All-Union Stratigraphic Meeting on the Precambrian, Paleozoic and Quaternary Periods in Middle Siberia, 1983. SNIGGiMS, Novosibirsk, 215 p. (in Russian) [Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1983. 215 с.].

Derry L.A., Brasier M.D., Corfield R.M., Rozanov A.Yu., Zhuravlev A.Yu., 1994. Sr and C Isotopes in Lower Cambrian Carbonates from the Siberian Craton: A Paleoenvironmental Record during the Cambrian Explosion. *Earth and Planetary Science Letters* 128, 671–681. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90178-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90178-3).

Geological Map of the USSR, 1968. Kuzbass Series. Scale 1:200 000. Sheet N-44-XVIII (Cherepanovo). Explanatory Note. Nedra, Moscow, 76 p. (in Russian) [Геологическая карта СССР. Серия Кузбасская. Масштаб 1:200 000. Лист N-45-XVIII (Черепаново): Объяснительная записка. М.: Недра, 1968. 76 с.].

Gorokhov I.M., Semikhatov M.A., Baskakov A.V., Kutyaev E.P., Melnikov N.N., Sochava A.V., Turchenko T.L., 1995. Sr Isotopic Composition in Riphean, Vendian, and Lower Cambrian Carbonates from Siberia. *Stratigraphy and Geological Correlation* 3 (1), 1–28.

Halverson G.P., Wade B.P., Hurtgen M.T., Barovich K.M., 2010. Neoproterozoic Chemostratigraphy. *Precambrian Research* 182 (4), 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.04.007>.

Letnikova E.F., Kuznetsov A.B., Vishnevskaya I.A., Terleev A.A., Konstantinova G.V. 2011. The Geochemical and Isotope (Sr, C, O) Characteristics of the Vendian – Cambrian Carbonate Deposits of the Azyr-Tal Ridge (Kuznetsk Alatau): Chemostratigraphy and Sedimentogenesis Environments. *Russian Geology and Geophysics* 52 (10), 1154–1170. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.09.009>.

Li D., Shields-Zhou G.A., Ling H.-F., Thirlwall M., 2011. Dissolution Methods for Strontium Isotope Stratigraphy: Guidelines for the Use of Bulk Carbonate and Phosphorite Rocks. *Chemical Geology* 290 (3–4), 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.09.004>.

Melezhik V.A., Ihlen P.M., Kuznetsov A.B., Gjelle S., Solli A., Gorokhov I.M., Fallick A.E., Sandstad J.S., Bjerkgard T., 2015. Pre-Sturtian (800–730 Ma) Depositional Age of Carbonates in Sedimentary Sequences Hosting Stratiform Iron Ores in the Uppermost Allochthon of the Norwegian Caledonides: A Chemostratigraphic Approach. *Precambrian Research* 261, 272–299. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.02.015>.

Roslyakov N.A., Shcherbakov Yu.G., Alabin L.V., Nesterenko G.V., Kalinin Yu.A., Roslyakova N.V., Vasiliev I.P., Nevolko A.I., Osintsev S.R., 2001. Minerageny of the Junction Area of Salair and the Kolyvan-Tomsk Fold Zone. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 243 p. (in Russian) [Росляков Н.А., Щербаков Ю.Г., Алабин Л.В., Нестеренко Г.В., Калинин Ю.А., Рослякова Н.В., Васильев И.П., Неволько А.И., Осинцев С.Р. Минерогения области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 243 с.].

Shcherbakov Yu.G., Roslyakova N.V., Lebedev Yu.N., Dolnitsyn E.F., 1987. Polychronism and Geochemical Features of the Salair Ore Field. In: I.V. Nikolaev (Ed.), *Regional Geochronology of Siberia and the Far East*. Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Academy of Science. Vol. 690. Nauka, Novosibirsk, p. 82–98 (in Russian) [Щербаков Ю.Г., Рослякова Н.В., Лебедев Ю.Н., Доильницын Е.Ф. Полихронность и геохимические особенности Салаирского рудного поля // Региональная геохронология Сибири и Дальнего Востока: Труды ИГиГ АН СССР / Ред. И.В. Николаева. Новосибирск: Наука, 1987. Вып. 690. С. 82–98].

State Geological Map of the Russian Federation, 2005. Altai-Sayansk Series. Scale 1:1000000. Sheet N-45 (Novokuznetsk). VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Алтае-Саянская. Масштаб 1:1000000. Лист N-45 (Новокузнецк). СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005].

State Geological Map of the Russian Federation, 2007. Altai-Sayansk Series. Scale 1:1000000. Sheet N-45 (Novokuznetsk). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 665 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия

Алтае-Саянская. Масштаб 1:1000000. Лист N-45 (Новокузнецк): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. 665 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2015. Altai-Sayan Series. Scale 1:1000000. Sheet N-44 (Novosibirsk). VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Алтае-Саянская. Масштаб 1:1000000. Лист N-44 (Новосибирск). СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015].

Vermeesch P., 2018. IsoplotR: A Free and Open Toolbox for Geochronology. *Geoscience Frontiers* 9 (5), 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>.

Vishnevskaya I.A., Letnikova E.F., 2013. Chemostratigraphy of the Vendian – Cambrian Carbonate Sedimentary Cover of the Tuva-Mongolian Microcontinent. *Russian Geology and Geophysics* 54 (6), 567–586. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.04.008>.

Vishnevskaya I.A., Letnikova E.F., Kanygina N.A., Proshenkin A.I., Soloshenko N.G., Vetrov E.V., Kiseleva V.Yu., 2018. Isotope Stratigraphy and U-Pb Dating of Detrital Zircons from the Vendian – Cambrian Deposits of the North Muya Block. *Russian Geology and Geophysics* 59 (11), 1433–1449. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.004>.