



THE APPLICATION OF SCANNING ELECTRON MICROSCOPY USING ENERGY- AND WAVELENGTH DISPERSIVE SPECTROMETERS FOR CHEMICAL DATING OF URANIUM MINERALIZATION ON THE EXAMPLE OF CARBONACEOUS SHALES OF THE DABANZHALGA SUITE (EAST SAYAN)

D.K. Belyanin ^{1,2✉}, N.S. Karmanov ¹, E.V. Airiyants ¹, S.M. Zhmodik ¹

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

² Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. On the one hand, the widespread use of electron microprobe analysis in the version of a scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy dispersive spectrometer (EDS) and, on the other hand, the comparability of the metrological characteristics of the EDS and wavelength dispersive spectrometry (WDS) in the case of determining the major components of minerals are a favourable background for investigating the possibility of using SEM-EDS for chemical dating of uranium mineralization. Carbonaceous-siliceous formations of the Dabanzhalga suite are widespread in carbonate deposits of the Lower Paleozoic in the Oka structural-formational zone of the East Sayan and represent deep-water deposits of the back-arc basin. All varieties of carbonaceous-siliceous rocks of the Dabanzhalga suite are characterized by increased U, Au, Ag, Pt, Pd, Mo, V, P, Cu. Their amounts are 5–10 times higher than those for other black shale deposits of the Eastern Sayan. Uranium forms its minerals – uraninite and brannerite, in association with carbonaceous matter and sulfides, and is also part of anhydrous phosphates – xenotime, monazite. The paper presents data on the composition and dating of brannerite and uraninite in samples of carbonaceous-siliceous shale sampled at three sites: Uber-Zhadoy, Deed-Khara-Zhalga and Erye-Khara-Zhalga. The obtained estimates of the isochronous dates of uraninite and brannerite grains for these areas are 523 ± 26 , 506 ± 10 , and 511 ± 17 Ma, respectively. It was shown that these dates could be compared with the age of metamorphism at the Sukhoi Log deposit, estimated using modern methods of isotope geochronology. It should be noted that the average estimates of the dates of uraninite and brannerite in all studied areas of the Dabanzhalga suite are lower than the corresponding estimates of the isochronous date, which is probably due to the partial loss of radiogenic lead. For the Uber-Zhadoy site, a comparison of the EDS and WDS data was carried out, and it was shown that when using the EDS data, there is an underestimation of the Pb content in uraninite, and, as a consequence, an underestimation of the age of uraninite.

KEYWORDS: East Sayan; metalliferous carbonaceous shale; chemical dating; uraninite; brannerite

FUNDING: Research work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. SEM-EDS/WDS analysis data were obtained at the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS.

SHORT COMMUNICATION

Received: December 7, 2021

Revised: January 19, 2022

Accepted: January 20, 2022

Correspondence: Dmitriy K. Belyanin, bel@igm.nsc.ru

FOR CITATION: Belyanin D.K., Karmanov N.S., Airiyants E.V., Zhmodik S.M., 2022. The Application of Scanning Electron Microscopy Using Energy- and Wavelength Dispersive Spectrometers for Chemical Dating of Uranium-Thorium Mineralization on the Example of Carbonaceous Shales of the Dabanzhalga Suite (East Sayan). *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0604. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0604

ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГО- И ВОЛНОДИСПЕРСИОННОГО СПЕКТРОМЕТРОВ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО ДАТИРОВАНИЯ УРАНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ УГЛЕРОДИСТЫХ СЛАНЦЕВ ДАБАНЖАЛГИНСКОЙ СВИТЫ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

Д.К. Белянин^{1,2}, Н.С. Карманов¹, Е.В. Айриянц¹, С.М. Жмодик¹

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

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

АННОТАЦИЯ. Широкое распространение электронно-зондового микроанализа в варианте сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), оборудованного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС), с одной стороны, и сопоставимость метрологических характеристик ЭДС и волнодисперсионного спектрометра (ВДС) в случае определения основных слагающих минерал элементов – с другой, являются благоприятным фоном для исследования возможности применения СЭМ-ЭДС с целью химического датирования урановой минерализации. Углеродисто-кремнистые образования дабанжалгинской свиты распространены в карбонатных отложениях нижнего палеозоя в Окинской структурно-формационной зоне Восточного Саяна и представляют собой глубоководные отложения задугового бассейна. Для всех разновидностей углеродисто-кремнистых пород дабанжалгинской свиты характерны повышенные содержания U, Au, Ag, Pt, Pd, Mo, V, P, Cu, которые в 5–10 раз превышают таковые для других черносланцевых отложений Восточного Саяна. Уран образует собственные минералы – уранинит и браннерит в ассоциации с углеродистым веществом и сульфидами, а также входит в состав безводных фосфатов – ксенотима, монацита. В работе представлены данные по изучению состава и определению возраста браннерита и уранинита в образцах углеродисто-кремнистых сланцев, отобранных на трех участках: Убэр-Жадой, Дэдэ-Хара-Жалга и Эрье-Хара-Жалга. Полученные оценки изохронного возраста зерен уранинита и браннерита для рассматриваемых участков составляют 523 ± 26 , 506 ± 10 и 511 ± 17 млн лет соответственно. Было показано, что эти датировки могут быть сопоставлены с возрастом метаморфизма на месторождении Сухой Лог, оцененным с помощью современных методов изотопной геохронологии. Следует отметить, что средние значения оценок возраста уранинита и браннерита на всех изучаемых участках дабанжалгинской свиты меньше, чем соответствующие оценки изохронного возраста, что, вероятно, обуславливается частичной потерей радиогенного свинца. Для участка Убэр-Жадой было проведено сопоставление данных ЭДС и ВДС и показано, что при использовании ЭДС существует занижение содержания Pb в уранините и, как следствие, занижение возраста уранинита.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточный Саян; металлоносные углеродистые сланцы; химическое датирование; уранинит; браннерит

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Научно-исследовательские работы выполнены в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки РФ. Данные сканирующей электронной микроскопии (SEM-EDS/WDS) получены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод химического датирования горных пород, предложенный А. Холмсом в 1911 г. [Holmes, 1911], изначально базировался на определении соотношения урана и свинца в урансодержащих минералах в соответствии с известным в это время уравнением распада: $U^{238} \rightarrow 8He + Pb^{206}$. При выборе минералов, которые можно уверенно использовать в качестве индикаторов возраста породы, использовались три критерия: 1) свинец не входил в состав минерала в момент его образования; 2) кроме радиоактивного распада урана отсутствуют другие процессы, приводящие к образованию свинца; 3) отсутствуют процессы привноса – выноса свинца и урана. Дальнейшее развитие химического датирования связано с распространением электронно-зондового микроанализа (микрозонд) [Suzuki et al., 1991; Montel et al., 1996; Pyle et al., 2005; Williams et al.,

2006; Suzuki, Kato, 2008; Votyakov et al., 2011]. Возрастающая популярность метода в варианте электронно-зондового микроанализа обусловлена его доступностью и относительно низкой себестоимостью единичного анализа. Кроме этого, несомненным достоинством метода является высокая локальность (2–3 мкм) и возможность анализа мономинеральных микроучастков, недоступная локальным изотопным методам анализа – SHRIMP и ICP-MS с лазерной абляцией. Следует отметить, что все работы по определению возраста химическим методом датирования выполнены с применением классического электронно-зондового микроанализа с волновой дисперсией. Однако в последнее время очень широкое распространение получает электронно-зондовый микроанализ в варианте сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), оборудованного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС). В работах

[Newbury, Ritchie, 2013; Lavrent'ev et al., 2015] показано, что методы ЭДС и волнодисперсионной спектроскопии (ВДС) обладают сопоставимыми метрологическими характеристиками при концентрациях определяемых компонентов выше 0.1 %, поэтому представляет интерес изучение возможности применения ЭДС для химического датирования минералов. В данной работе приводятся примеры оценки возраста формирования урановой минерализации (браннерита – UTi_2O_4 и уранинита – UO_2) в углеродисто-кремнистых сланцах дабанжалгинской свиты Восточного Саяна на основании их изучения с помощью сканирующей электронной микроскопии с использованием волнового и энергодисперсионного спектрометров.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Углеродисто-кремнистые образования дабанжалгинской свиты распространены в карбонатных отложениях нижнего палеозоя в Окинской структурно-формационной зоне (рис. 1) и представляют собой глубоководные отложения задугового бассейна [Zhmodik et al., 2014]. Для всех разновидностей углеродисто-кремнистых пород дабанжалгинской свиты (углеродистые кремни, углеродисто-кремнистые сланцы, углеродисто-глинисто-кремнистые сланцы) характерны повышенные содержания U, Au, Ag, Pt, Pd, Mo, V, P, Cu. Их количества в 5–10 раз превышают таковые для других черносланцевых отложений Восточного Саяна [Mironov et al., 2002; Zhmodik et al., 2014]. Радиоактивные элементы

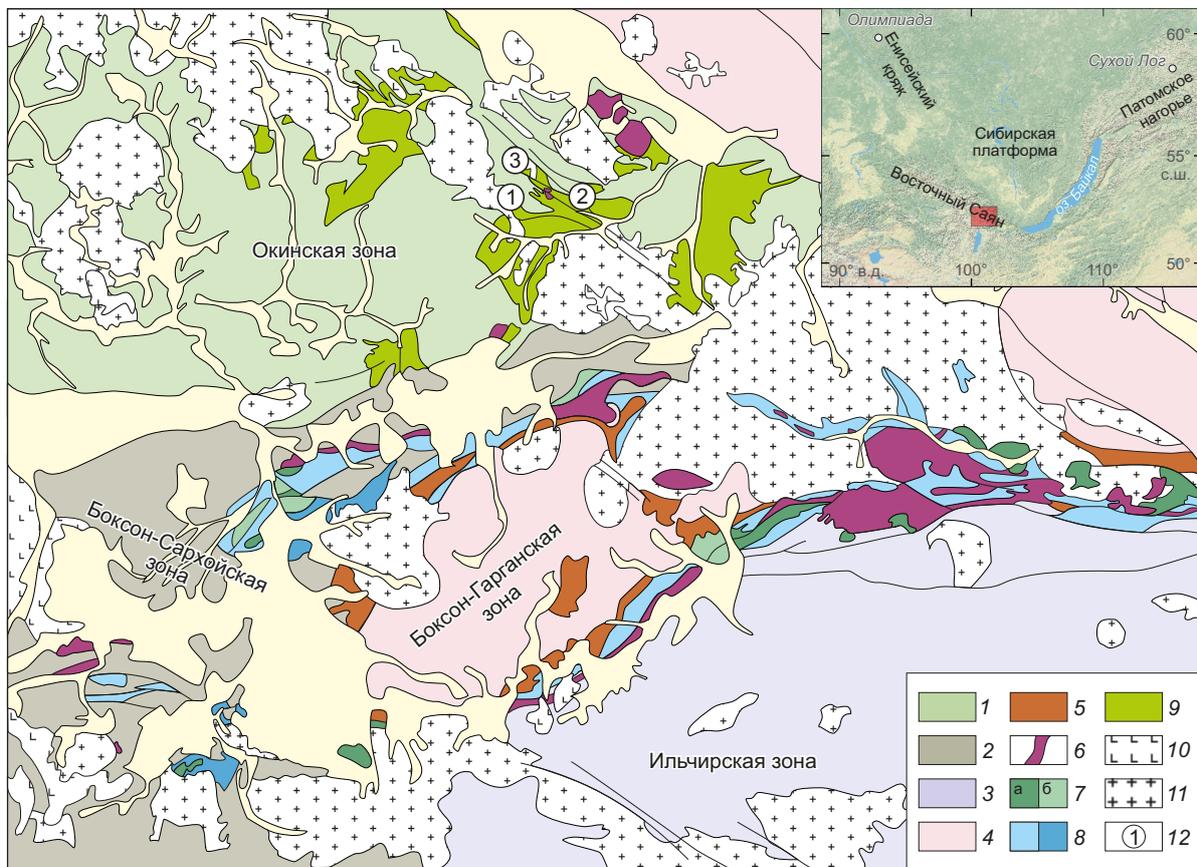


Рис. 1. Структурно-формационная схема юго-восточной части Восточного Саяна с местоположением участков опробования пород дабанжалгинской свиты.

1 – вулканогенно-терригенные отложения Окинской зоны; 2–3 – терригенно-карбонатные отложения: 2 – боксонской серии, 3 – ильчирской зоны; 4–5 – протерозойские метаморфические породы: 4 – Гарганского микроконтинента, 5 – иркутской (монгошинской) свиты; 6 – ультрабазиты офиолитов нерасчлененные; 7 – базиты офиолитовой формации: а – габбро, б – вулканилиты; 8 – кремнисто-карбонатные отложения и вулканогенно-терригенные отложения ильчирской и оспинской свит (синий цвет) с черными сланцами и кремнями; 9 – кремнисто-карбонатные отложения дабанжалгинской свиты; 10 – базальты; 11 – граниты нерасчлененные; 12 – участки изучения углеродистых отложений: 1 – Убэр-Жадоу, 2 – Дэдэ-Хара-Жалга, 3 – Эрье-Хара-Жалга.

Fig. 1. Structural-formational scheme of the southeastern part of the Eastern Sayan with the location of rock sampling sites of the Dabanzhalka Formation.

1 – volcanic-terrigenous deposits of the Oka zone; 2–3 – terrigenous-carbonate deposits: 2 – Boxson series, 3 – Ilchir zone; 4–5 – Proterozoic metamorphic rocks: 4 – Gargan microcontinent, 5 – Irkut (Mongoshinsky) suite; 6 – ultrabasic ophiolites, undivided; 7 – basic rocks of ophiolite formation: a – gabbro, b – volcanic rocks; 8 – siliceous-carbonate deposits and volcanogenic-terrigenous deposits of the Ilchir and Ospa suites (blue color) with black shales and cherts; 9 – siliceous-carbonate deposits of the Dabanzhalka formation; 10 – basalts; 11 – undivided granites; 12 – sites for the study of carbonaceous deposits: 1 – Uber-Zhadoy, 2 – Dede-Khara-Zhalga, 3 – Erye-Khara-Zhalga.

образуют минералы (уранинит, браннерит) в ассоциации с углеродистым веществом и сульфидами, а также входят в состав безводных фосфатов (ксенотим, монацит) [Belyanin et al., 2016]. Микронные кристаллы уранинита и браннерита хорошо огранены, что свидетельствует о том, что они сформировались на этапе метаморфизма урансодержащего углеродистого вещества отложений дабанжалгинской свиты. В работе показаны данные по изучению состава браннерита и уранинита в образцах углеродисто-кремнистых сланцев, отобранных на трех участках: Убэр-Жадой, Дэдэ-Хара-Жалга, Эрье-Хара-Жалга. Образцы участка Убэр-Жадой анализировались точечным зондом с помощью ВДС и ЭДС, образцы участков Дэдэ-Хара-Жалга, Эрье-Хара-Жалга анализировались небольшими площадками (малый растр) с помощью ЭДС.

Препараты для изучения представляли собой либо выпиленные из образцов пластинки, либо залитые в эпоксидный компаунд фрагменты образцов, отполированные с применением алмазных паст и напыленные слоем углерода толщиной до 25 нм. Определение состава минералов проводилось на СЭМ MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding), снабженном системами микроанализа INCA Energy 450+ X-Max 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd). Типичные условия анализа для ЭДС: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 1.6 нА, живое время набора спектров на образцах от 40 до 120 с. При данных условиях измерения разрешение рентгеновского спектрометра составляет 126–127 эВ на линии $Mn K_{\alpha}$, а размер зонда – 12 нм. Локальность анализа определяется размером области генерации рентгеновского излучения, которая достигает величины 2–3 мкм. Случайная погрешность определения основных компонентов ($C > 10$ –15%) обычно не превышает 1 отн. %. Нижняя граница определения Pb для целей химического датирования при живом времени набора спектра 60 с составляет 0.38–0.40 мас. %, а в случае увеличения живого времени набора до 120 с опускается до 0.22–0.24 мас. %, при этом случайная погрешность составляет 15–20 отн. %. В качестве аналитических использовались М-серии линий U, Th и Pb. Учет возможных взаимных наложений линий определяемых элементов осуществлялся обычным образом по алгоритмам программного обеспечения INCA Energy.

Определение U, Th и Pb с применением ВДС INCA Wave 500 выполняли при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка электронов 20 нА, при этом одновременно регистрировался энергодисперсионный спектр. В качестве аналитических использовались линии $U M_{\beta}$, $Th M_{\alpha}$, $Pb M_{\alpha}$. Время измерения на пике линии для U и Th составляло 20–40 с, а для Pb достигало 200 с. Суммарное время измерения интенсивности фона с обеих сторон от пика линии было равно времени измерения на пике линии. Нижняя граница определяемых концентраций для Pb составляла 0.05 %. При расчете концентраций учитывались наложения линий Th и Y на линию $Pb M_{\alpha}$. В качестве образцов сравнения как для ВДС, так и для ЭДС использовали оксиды урана и тория (UO_2 , ThO_2), а

также пирофосфат свинца ($Pb_2P_2O_7$). Учет матричных эффектов в программном обеспечении INCA осуществляется методом ХРР.

Методика обработки данных содержания U, Th, Pb с целью химического датирования с помощью построения изохрон или определения точечного возраста описана в работах [Suzuki et al., 1991; Montel et al., 1996; Votyakov et al., 2011].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ХИМИЧЕСКОГО ДАТИРОВАНИЯ УГЛЕРОДИСТО-КРЕМНИСТЫХ СЛАНЦЕВ ДАБАНЖАЛГИНСКОЙ СВИТЫ

В углеродисто-кремнистых сланцах участка Убэр-Жадой составы уранинита и браннерита по данным ЭДС и ВДС незначительно различаются (табл. 1; рис. 2). Разница между данными ЭДС и ВДС (относительно ВДС) по содержанию Pb в браннерите и уранините в среднем составляет 2 и –4 отн. %, а по содержанию U разница для обоих минералов в среднем составляет –1 отн. %. Содержание Th в уранините и браннерите не превышает долей процента, в большинстве случаев, по данным

Таблица 1. Содержание U и Pb в уранините и браннерите из углеродисто-кремнистых сланцев участка Убэр-Жадой по данным ЭДС и ВДС в мас. %

Table 1. Contents of U and Pb in uraninite and brannerite from the carbonaceous-siliceous shales of the Uber-Zhadoy site according to EDS and WDS data, wt %

Минерал	U ЭДС	U ВДС	U Δ, %	Pb ЭДС	Pb ВДС	Pb Δ, %
Браннерит	46.3	46.78	-1	3.3	3.19	2
Браннерит	48.9	50.07	-2	3.3	3.34	-1
Браннерит	49.2	49.26	0	3.5	3.31	4
Уранинит	79.3	79.22	0	5.3	5.77	-9
Уранинит	81.0	79.18	2	5.6	5.89	-5
Уранинит	80.6	77.33	4	5.7	5.72	0
Уранинит	76.1	75.29	1	5.5	5.76	-4
Уранинит	75.4	75.31	0	5.2	5.57	-7
Уранинит	76.4	75.39	1	5.4	5.78	-7
Уранинит	76.4	75.37	1	5.4	5.75	-7
Уранинит	82.7	85.30	-3	5.8	5.98	-3
Уранинит	81.1	82.33	-2	5.7	5.78	-1
Уранинит	79.4	81.10	-2	5.5	5.75	-4
Уранинит	77.8	78.76	-1	5.5	5.36	2
Уранинит	76.7	78.93	-3	5.3	5.56	-5
Уранинит	77.6	80.40	-3	5.4	5.76	-6
Уранинит	77.6	78.65	-1	5.3	5.5	-3
Уранинит	82.8	82.50	0	6.0	6.05	-2
Уранинит	76.8	80.32	-4	5.2	5.54	-6
Уранинит	82.5	81.58	1	5.9	5.75	3
Уранинит	78.7	80.70	-3	5.6	5.78	-3

Примечание. Анализы ВДС и ЭДС проводились в одной точке. Δ – разница между данными ЭДС и ВДС (относительно ВДС).

Note. WDS and EDS analyzes were carried out at the same point. Δ – the difference between the EDS and WDS data (relative to the WDS).

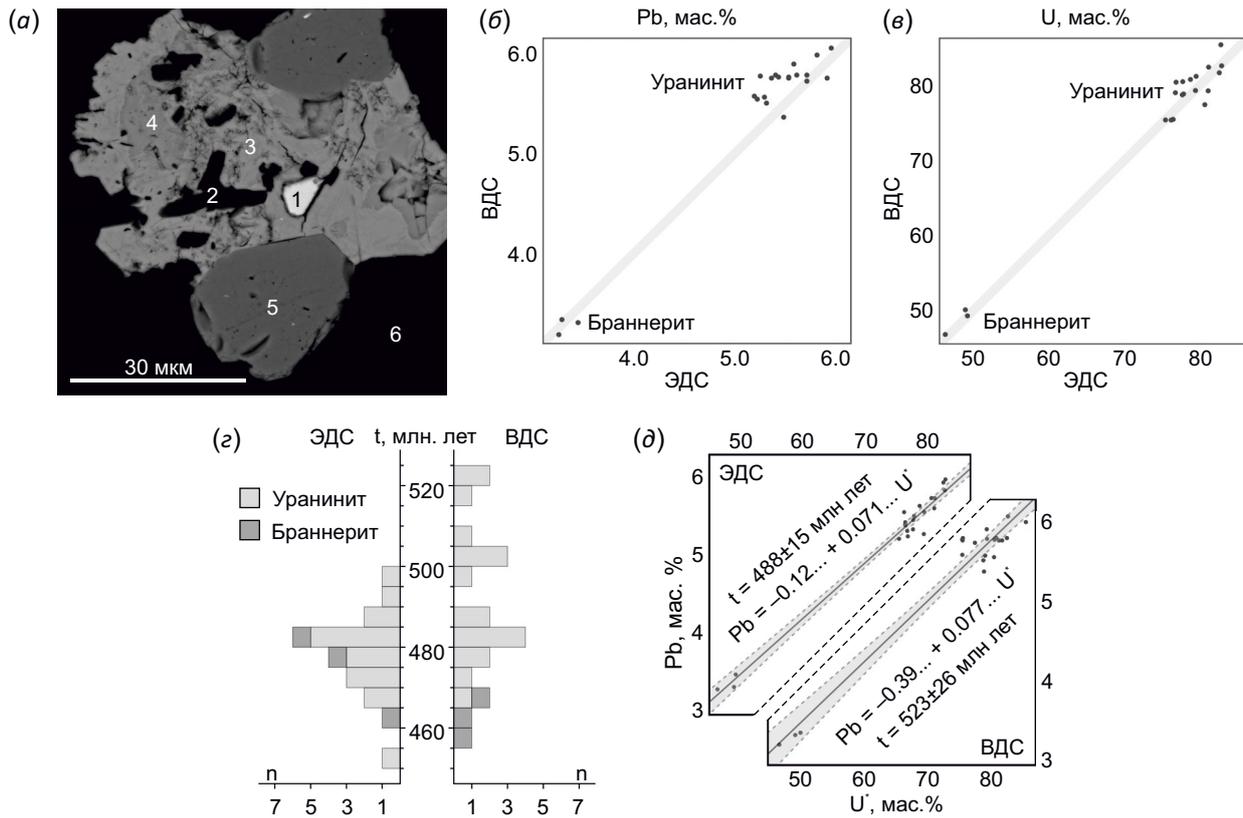


Рис. 2. Углеродисто-кремнистый сланец участка Убэр-Жадо́й. Снимок в обратнорассеянных электронах (а), включение браннерита (1) совместно с чешуйками графита (2) в халькозине (3), в ассоциации сфалерита (4), пирита (5), калиевого полевого шпата и кварца (6); содержание в уранините и браннерите Pb (б) и U (в) по данным ЭДС и ВДС и гистограмма распределения оценок возраста (г) браннерита и уранинита (точечный зонд); изохроны U*-Pb с составами уранинитов и браннеритов по данным ЭДС и ВДС (д).

Fig. 2. Carbonaceous-siliceous shale of the Uber-Zhadoy site. Backscattered electron image (a), inclusion of brannerite (1) together with graphite flakes (2) in chalcocite (3), in the association of sphalerite (4), pyrite (5), potassium feldspar and quartz (6); the content of Pb (b) and U (c) in uraninite and brannerite according to the EDS and WDS data and the histogram of the distribution of age estimates (g) of brannerite and uraninite (point probe); U*-Pb isochrones with compositions of uraninites and brannerites according to EDS and WDS data (d).

ЭДС, ниже предела обнаружения. Возраст уранинита по данным ЭДС и ВДС при анализе точечным зондом в среднем составляет 478 ± 10 и 493 ± 17 млн лет (n 18), изохронный возраст (U*-Pb) 557 ± 78 и 175 ± 95 млн лет. Изохронный возраст по объединенным данным уранинита и браннерита составил 488 ± 15 и 523 ± 26 млн лет – результаты ЭДС и ВДС соответственно. В углеродисто-кремнистых сланцах участка Дэдэ-Хара-Жалга урановая минерализация представлена браннеритом с примесью Y и уранинитом. Среднее значение оценок возраста уранинита и браннерита (ЭДС, малый растр) 500 ± 23 (n 3) и 500 ± 18 (n 15) млн лет, изохронный возраст 639 ± 102 и 497 ± 25 млн лет. Изохронный возраст по объединенным данным уранинита и браннерита составил 506 ± 10 млн лет. В углеродистых кварц-серицит-полевошпатовых сланцах участка Эрье-Хара-Жалга урановая минерализация представлена уранинитом и замещающим его торбернитом ($\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Среднее значение оценок возраста уранинита (ЭДС, малый растр) 470 ± 33 млн лет (n 66), изохронный возраст 511 ± 17 млн лет.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Идиоморфные зерна уранинита и браннерита сформировались на этапе метаморфизма из глубоководных отложений задугового бассейна, обогащенных органическим веществом, концентрирующим уран, благородные металлы, Mo, V, P, Cu. Микроразрывы уранинита и браннерита часто можно наблюдать в ассоциации с углеродистым веществом и сульфидами, т.е. полученный возраст химического датирования уранинита и браннерита отражает время метаморфизма дабанжалгинской свиты и, вероятно, время перераспределения рудных элементов. Можно предположить, что возможное влияние последующих магматических, метаморфических или тектонических процессов могло «омолодить» получаемые датировки, поскольку Pb является несовместимым с уранинитом, в случае рекристаллизации уранинита следует ожидать потерю радиогенного Pb. Содержания Pb в уранините сланцев участка Убэр-Жадо́й по данным ЭДС занижены относительно соответствующих данных ВДС, что нашло отражение в более низком значении средней оценки возраста

уранинита – 478 ± 10 против 493 ± 17 млн лет. Аналогичная разница наблюдается между изохронными возрастными по объединенным данным составов уранинита и браннерита: 488 ± 15 и 523 ± 26 млн лет – результаты ЭДС и ВДС соответственно. Наблюдаемое для уранинита сланцев участка Убэр-Жадоу занижение датировок по данным ЭДС относительно ВДС, связанное с определением более низких содержаний Pb в уранините методом ЭДС, вероятно, вызвано ошибками в обработке энергодисперсионных спектров. Можно предположить, что для зерен уранинита, обладающих размером в первые микрометры, такие ошибки могут быть обусловлены попаданием в область генерации характеристического рентгеновского излучения минералов вмещающей уранинит матрицы, в частности сульфидов. Следовательно, для сланцев участка Убэр-Жадоу более предпочтительными для рассмотрения являются оценки возраста урановой минерализации, полученные по данным ВДС, – 523 ± 26 млн лет (изохронный возраст по составам уранинита и браннерита) и 493 ± 17 млн лет (среднее значение оценок возраста уранинита). Эти оценки возраста в пределах погрешностей могут быть сопоставлены с оценками возраста урановой минерализации на участках Дэдэ-Хара-Жалга и Эрье-Хара-Жалга, полученными по данным ЭДС. В первом случае среднее значение оценок возраста браннерита составило 500 ± 18 млн лет, а изохронный возраст по объединенным данным составов уранинита и браннерита – 506 ± 10 млн лет. Во втором случае среднее значение оценок возраста уранинита 470 ± 33 млн лет и изохронный возраст 511 ± 17 млн лет. Можно заметить, что среднее значение оценок возраста уранинита и браннерита на всех изучаемых участках дабанжалгинской свиты меньше, чем соответствующие оценки изохронного возраста, что, вероятно, обуславливается частичной потерей радиогенного свинца. При интерпретации полученных возрастных датировок радиоактивной минерализации дабанжалгинской свиты можно обратиться к литературным данным по уникальным месторождениям золота, связанным с углеродисто-карбонатно-терригенными породами в соседствующих с Восточным Саяном Енисейском и Ленском районах. Например, на месторождении Сухой Лог известны датировки для вмещающих оруденение терригенных толщ, возникших в период от раннего до среднего рифея (около 800 млн лет) и подвергшихся метаморфизму в период 516 ± 22 млн лет [Distler et al., 2004]. Согласно изотопному составу свинца в пирите, было показано, что самый ранний (стратиформный) пирит, содержащий Pb и Au, образовался до метаморфизма, возможно во время осадконакопления или раннего диагенеза (575 – 600 млн лет) [Meffre et al., 2008]. При этом Re-Os-изотопные датировки сульфидов позволяют предположить, что метаморфическая минерализация Сухого Лога образовалась между 470 и 508 млн лет [Yakubchuk et al., 2014], а согласно обобщению М.А. Юдовской с соавторами [Yudovskaya et al., 2016] сроки высокотемпературного оруденения

Сухого Лога приурочены к возрастному интервалу 460 – 440 млн лет. Таким образом, полученные оценки изохронного возраста зерен уранинита и браннерита для трех участков дабанжалгинской свиты (523 ± 26 , 506 ± 10 и 511 ± 17 млн лет.) могут быть сопоставлены с возрастом метаморфизма на месторождении Сухой Лог, оцененного с помощью современных методов изотопной геохронологии.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны И.С. Кириченко и О.Н. Киселевой за помощь в проведении экспедиционных работ и сборе коллекции образцов. Авторы признательны С.Л. Вотякову и неизвестному рецензенту за ценные комментарии и рекомендации по совершенствованию исследования.

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

Belyanin D.K., Karmanov N.S., Ayriyants E.V., Zhmodik S.M., Ponomarchuk V.A., 2016. The Application of Scanning Electron Microscopy Using Energy- and Wave-Dispersive Spectrometers for Chemical Dating of Uranium-Thorium Mineralization. In: Radioactivity and Radioactive Elements in the Human Environment. Proceedings of the V International Conference (September 13–16, 2016). Publishing House of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, p. 116–120 (in Russian) [Белянин Д.К., Карманов Н.С., Айриянец Е.В., Жмодик С.М., Пономарчук В.А. Применение сканирующей электронной микроскопии с использованием энерго- и волнодисперсионного спектрометров для химического датирования уран-ториевой минерализации // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции (13–16 сентября 2016 г.). Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 116–120].

Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokofiev V.Yu., Lishnevskii E.N., 2004. Geology, Composition, and Genesis of the Sukhoi Log Noble Metals Deposit, Russia. Ore Geology Reviews 24 (1–2), 7–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>.

Holmes A., 1911. The Association of Lead with Uranium in Rock-Minerals, and Its Application to the Measurement of Geological Time. Proceedings of the Royal Society A:

Mathematical, Physical and Engineering Sciences 85 (578), 248–256. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1911.0036>.

Lavrent'ev Yu.G., Karmanov N.S., Usova L.V., 2015. Electron Probe Microanalysis of Minerals: Microanalyzer or Scanning Electron Microscope? *Russian Geology and Geophysics* 56 (8), 1154–1161. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.07.006>.

Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M., 2008. Age and Pyrite Pb-Isotopic Composition of the Giant Sukhoi Log Sediment-Hosted Gold Deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72 (9), 2377–2391. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005>.

Mironov A.G., Zhmodik S.M., Ochirov Yu.Ch., Gurskaya L.I., Popov V.D., Sapozhnikov D.Yu., 2002. Black Shale Formations in the Sayan-Baikal Mountainous Province: Geochemistry, Metallogeny, and Geodynamic Environments. *Russian Geology and Geophysics* 43 (4), 364–381 (in Russian) [Миронов А.Г., Жмодик С.М., Очиров Ю.Ч., Гурская Л.И., Попов В.Д., Сапожников Д.Ю. Геохимия и металлоносность углеродистых отложений различных геодинамических обстановок Саяно-Байкальской горной области // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 4. С. 364–381].

Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A., 1996. Electron Microprobe Dating of Monazite. *Chemical Geology* 131 (1–4), 37–53. [http://dx.doi.org/10.1016/009-2541\(96\)00024-1](http://dx.doi.org/10.1016/009-2541(96)00024-1).

Newbury D.E., Ritchie N.W.M., 2013. Is Scanning Electron Microscopy / Energy Dispersive Spectrometry (SEM/EDS) Quantitative? *Scanning* 35 (3), 141–168. <http://dx.doi.org/10.1002%2Fscs.21041>.

Pyle J.M., Spear F.S., Wark D.A., Daniel C.G., Storm L.C., 2005. Contributions to Precision and Accuracy of Monazite Microprobe Ages. *American Mineralogist* 90 (4), 547–577. <http://dx.doi.org/10.2138/am.2005.1340>.

Suzuki K., Adachi M., Tanaka T., 1991. Middle Precambrian Provenance of Jurassic Sandstone in the Mino Terrane, Central Japan: Th-U-Total Pb Evidence from an Electron Microprobe Monazite Study. *Sedimentary Geology* 75 (1–2), 141–147. [http://dx.doi.org/10.1016/0037-0738\(91\)90055-1](http://dx.doi.org/10.1016/0037-0738(91)90055-1).

Suzuki K., Kato T., 2008. CHIME Dating of Monazite, Xenotime, Zircon and Polycrase: Protocol, Pitfalls and Chemical Criterion of Possibly Discordant Age Data. *Gondwana*

Research 14 (4), 569–586. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.005>.

Votyakov S.L., Shchapova Yu.V., Hiller V.V., 2011. Crystal Chemistry and Physics of Radiation-Thermal Effects in U-Th-Containing Minerals as a Basis for Their Chemical Microprobe Dating. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, 340 p. (in Russian) [Вотьяков С.Л., Щапова Ю.В., Хиллер В.В. Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U-Th-содержащих минералов как основа для их химического микроразондового датирования. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2011. 340 с.].

Williams M.L., Jercinovic M.J., Goncalves P., Mahan K.H., 2006. Format and Philosophy for Collecting, Compiling, and Reporting Microprobe Monazite Ages. *Chemical Geology* 225 (1–2), 1–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.07.024>.

Yakubchuk A., Stein H., Wilde A., 2014. Results of Pilot Re-Os Dating of Sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada Orogenic Gold Deposits, Russia. *Ore Geology Reviews* 59, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.003>.

Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N., 2016. Gold Mineralisation and Orogenic Metamorphism in the Lena Province of Siberia as Assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log Deposits. *Geoscience Frontiers* 7 (3), 453–481. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>.

Zhmodik S.M., Mironov A.G., Belyanin D.K., Ayriyants E.V., Kiseleva O.N., 2014. Types of Carbonaceous Formations of the Southeastern Part of the Eastern Sayan. In: Noble, Rare and Radioactive Elements in Ore-Forming Systems. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation Dedicated to the 120th Anniversary of the Birth of Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences, Professor F.N. Shakhova (October 28–30, 2014). Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, p. 239–244 (in Russian) [Жмодик С.М., Миронов А.Г., Белянин Д.К., Айриянец Е.В., Киселева О.Н. Типы углеродистых образований юго-восточной части Восточного Саяна // Благородные, редкие и радиоактивные элементы в рудообразующих системах: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР, профессора Ф.Н. Шахова (28–30 октября 2014 г.). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014. С. 239–244].