

УДК 550.93:553.495

ГИДРОТЕРМАЛЬНОЕ УРАНОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В ТУЮКАНСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ): ВРЕМЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАСТУРАНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ И ВОЗРАСТ ИСТОЧНИКА ВЕЩЕСТВА

© 2024 г. В. Н. Голубев^{1,*}, Н. В. Леденева², И. В. Рассохина¹,
Л. А. Левицкая¹, А. М. Чепчугов²

Представлено академиком И.В. Чернышевым 29.03.2024 г.

Поступило 29.03.2024 г.

После доработки 01.04.2024 г.

Принято к публикации 08.04.2024 г.

На основе изучения локальных объемов минералов с помощью классических методов изотопного разбавления и термоионизационной масс-спектрометрии (U–Pb ID-TIMS), проведено изотопное изучение настурана и галенита в урановом рудопоявлении Натали (Северное Забайкалье). Впервые показано, что настурановая минерализация на рудопоявлении имеет позднесилурийский (422 ± 4 млн лет) возраст. Её формирование связано с ранне-среднепалеозойским коллизийным тектогенезом в районе Тонодского поднятия, сопровождавшемся активизацией флюидной деятельности. Результаты определения изотопного состава Pb в ассоциирующем с настураном галените показали, что он обогащён радиогенными изотопами ^{206}Pb и ^{207}Pb , источником которых служили древние (докембрийские) концентрации урана.

Ключевые слова: Тонодское поднятие, настуран, U–Pb (ID-TIMS) изотопный метод, гипергенные изменения, источник рудного вещества

DOI: 10.31857/S2686739724080047

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена решению вопроса о возрасте уранового оруденения в одной из крупнейших в России Северо-Байкальской золоторудной провинции, которая рассматривается и как перспективная на эндогенное урановое оруденение. Туюканское рудное поле и, входящее в него, рудопоявление Натали расположены в пределах потенциально урановорудного Тонодского района, который является частью Северо-Прибайкальской рудной провинции [1]. В этом районе в последние годы геологами ВСЕГЕИ и ВИМСа проводились работы, имевшие целью уточнение геологических и генетических особенностей образования урановых руд [2–5]. Во всех упомянутых работах авторы отмечают полихронность и многоэтапность формирования урановой и золотой минерализации как

в провинции в целом, так и непосредственно в Тонодском районе. В качестве основания для такого вывода авторы приводят результаты геологических наблюдений. В работах [3, 5] рассмотрены также U–Pb данные, полученные по настурану рудопоявления Натали [3] и ряду других урановорудных объектов Туюканского рудного поля [5]. Следует отметить, что представления о возрасте и полихронности уранового оруденения в этих работах существенно отличаются.

В работе [5] для урановой минерализации Тонодского поднятия приведена гистограмма распределения значений U–Pb возраста, которая представляет собой результат суммирования определений величины Pb/U в урановых рудах по материалам различных отчетов. Эти данные получены методом “общего свинца” без масс-спектрометрического контроля изотопного состава свинца, т.е. метода, который в изотопной геохронологии с середины прошлого столетия не рассматривается как метод получения достоверных возрастных данных. На представленной гистограмме “значения возраста” образуют спектр от 350 до 1.5 млрд лет, с различной

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского, Москва, Россия

*E-mail: golub238@gmail.com

частотой в разных возрастных интервалах. По мнению авторов цитируемой работы, приведенная картина U–Pb возрастов свидетельствует о том, что (цитируем) “эндогенное урановое оружение формировалось полихронно на протяжении всего рифея в период 1.5–0.6 млрд лет с последним перераспределением в палеозое (около 0.4 млрд лет)”. Цифры возраста, полученные этим методом, как и результаты их статистической обработки, представляют собой артефакты.

В статье [3] приведены данные U–Pb изотопного изучения (U–Pb ID-TIMS) шести проб настурана с рудопоявления Натали. Авторами статьи на основании выборочной обработки трех из шести проанализированных проб настурана на диаграмме с конкордией (Аренса-Везерилла) была построена дискордия. Её верхнее пересечение с конкордией, определяющее, по мнению авторов, “возраст первичного диоксида урана”, отвечает значению 1234 ± 12 млн лет, а нижнее — определяющее время “проявления однократного интенсивного наложенного процесса, приведшего к существенной перекристаллизации, вероятно, первичного уранинита с образованием настурана — 359 ± 3 млн лет”. Из этих данных делается вывод, что формирование урановой минерализации в Туюканском рудном поле прошло в два этапа: образование первичной урановой минерализации в мезопротерозойское время и отложение настурана в позднедевонское время. Анализ рассмотренных в статье аналитических данных показывает, что величина отношения $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ проб настурана прямо пропорциональна величине отношения в них $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ($R^2 = 0.998$) или доле примесного свинца в пробе. Отсюда следует, что примесный свинец этих проб содержит избыточный радиогенный свинец, коррекция на который не была выполнена авторами работы, что в конечном счете привело к ошибочной оценке возраста урановой минерализации.

В нашей статье представлены результаты изотопно-геохронологического изучения настурана и ассоциирующего с ним галенита из рудопоявления Натали. Они получены авторами на основании детально разработанных современных подходов и методик изотопного U–Pb датирования и апробированных при изучении многочисленных урановых месторождений Евразии [6–12 и другие работы]. Это позволило определить основные этапы в истории формирования урановой минерализации Туюканского рудного поля. Работа выполнена в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТУЮКАНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Объект настоящего исследования — рудопоявление Натали находится в пределах Туюканского рудного поля, в краевой юго-западной части Тонодского поднятия — потенциально урановорудного района Северного Забайкалья (рис. 1). Тонодское поднятие представляет собой выступ кристаллического основания, занимающий внутреннюю часть Байкало-Патомского перикратонного прогиба, выполненного стратифицированными образованиями рифейского прото-платформенного чехла. Граница между чехлом и фундаментом в период среднепалеозойского тектогенеза была значительно осложнена покровно-надвиговыми структурами.

Туюканское рудное поле сложено позднекарьельскими полифазными гранитоидами чуйско-нечерского комплекса ($\gamma\text{KR}_2\epsilon n$) (Кевактинский массив), содержащими ксенолиты раннекарьельских метаосадочных пород. Этап гранитизации завершился проявлением базитового магматизма туюканского комплекса ($\beta\text{KR}_{1-2}t$) в виде даек и силлов долеритов. С полосами сгущения даек метабазитов пространственно ассоциируют наиболее значимые из выявленных на площади урановые объекты: месторождение Туюкан и рудопоявление Натали (см. рис. 1).

Важное рудоформирующее значение на Туюканском рудном поле имел ранне-среднепалеозойский коллизионный тектогенез, при котором вмещающие породы чехла и фундамента подверглись катакластическим и пластическим деформациям с образованием зон расщепления, милонитизации и синтетектонического метаморфизма, сопровождавшихся активизацией флюидной деятельности.

Высокорадиоактивные аномалии на рудопоявлении Натали, вскрытые на поверхности и на глубине 14–15 м, приурочены к зоне сдвиговых деформаций вдоль контакта гранитов с дайкой изменённого долерита. Рудная зона сложена дифференцированными по составу милонитами и бластомилонитами, состоящими преимущественно из кварца, альбита, биотита и неравномерно обогащенными карбонатом, эпидотом, апатитом и сфеном.

Урановорудная минерализация локализована в щелевых порах и линзовидных расщелинах бластомилонитизированной породы в условиях, близких к отложению в открытых полостях. Это является свидетельством синтетектонического образования минерализации

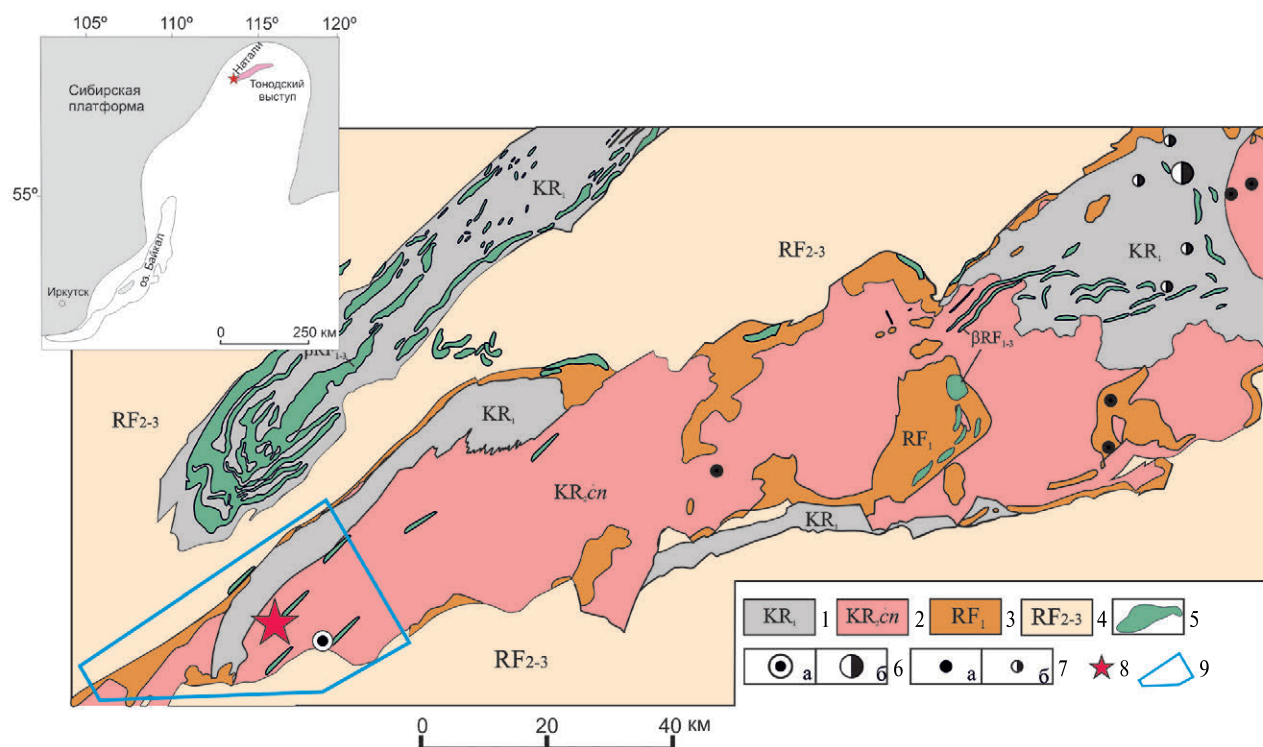


Рис. 1. Схема геологического строения западной части Тондоского поднятия (Северное Забайкалье). Составлена на основе геолого-структурной схемы Тондоского поднятия с элементами прогноза на уран и золото [5].

1 – метапесчанники, алевролиты, сланцы, в т. ч. углеродистые фундамента (KR_1); 2 – гранитоиды нечеро-ничатского комплекса (KR_{2cn}); 3 – песчанники, конгломераты, железистые кварциты чехла (RF_1); 4 – терригенно-карбонатные формации чехла (RF_{2-3}); 5 – тела габбро-долеритов и метагаббро (KR_2-RF_{1-3}); 6 – месторождения: а) урана (Туюканское), б) золота (Чертово Корыто); 7 – рудопроявления: а) урана; б) золота; 8 – рудопроявление Натали; 9 – перспективная поисковая площадь (Туюканская).

во время раннепалеозойского тектогенеза. Это дает основание для оценки нижней возрастной границы урановой минерализации – не древнее раннего палеозоя. Основной урановый минерал – настуран образует линзовидные прожилки, мощностью до 1.5 см. Он образует массивные и почковидные выделения. Вместе с настураном в прожилках присутствуют: кварц, карбонат, железистый хлорит, пирит и халькопирит с галенитом (рис. 2 А). В ассоциации с сульфидами встречаются мелкие выделения самородного висмута (рис. 2 Б).

Образование сульфидно-настурановой ассоциации не сопровождается какими-либо метасоматическими изменениями породы в околопрожилковом пространстве. Настуран контактирует непосредственно с породообразующими минералами. Эти особенности локализации и формирования урановорудных обособлений являются признаками регенерационного минералообразования, при котором источником вещества следует считать урановые концентрации более древнего возраста.

Изучение настурана под микроскопом и с помощью электронного микрозонда показало, что он неоднороден. Это обусловлено как присутствием в нем других минеральных фаз (силикатов, сульфидов и др.), так и неоднородностью собственно настурановой матрицы. Минералогическая неоднородность настурана видна и при анализе результатов определения элементного состава на рентгеновском микроанализаторе “JXA-8100” (табл. 1). В таблице номера 2, 3 и 5-10 отвечают настурану, а номер 11 – казолиту (?).

В изучаемых образцах установлены гипергенные минералы урана (казолит, кюрит), и свинца (церуссит). Казолит и кюрит отмечаются локально и сравнительно редко, а церуссит развит шире, образуя пятнистые и микропрожилковые выделения в настуране.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методическая основа настоящей работы – изучение минералогически идентифицированных локальных микрообъемов минералов,

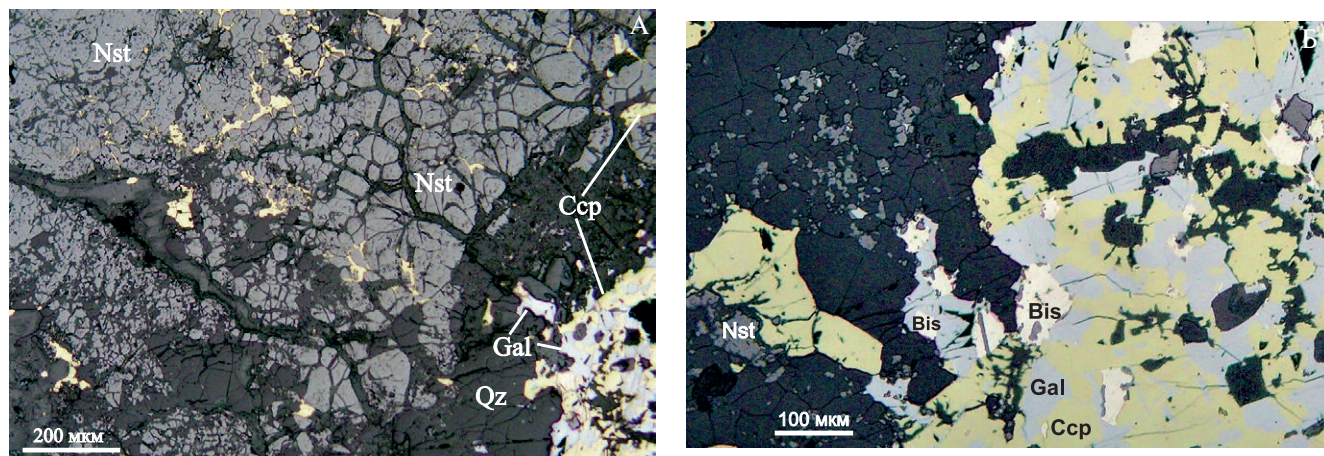


Рис. 2. Урановорудная линза Р-1. А: кварц (Qz), халькопирит (Ccp) и галенит (Gal) выполняют центральную зону настуранового прожилка и развиваются по трещинкам в настуране (Nst); Б: сросток халькопирита (Ccp) с галенитом (Gal) и самородным висмутом (Bis) в прожилке с настураном (Nst). Фото аншлифа.

включающее их микропробоотбор и последующее определение в микропробах Pb/Pb и Pb/U изотопных отношений с помощью классических, наиболее точных в изотопной геохронологии, методов термоионизационной масс-спектрометрии и изотопного разбавления (U–Pb ID-TIMS). Исследование проводили в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН. Анализировали микропробы настурана массой от 8 до 20 мкг и галенита — от 0.5 до 2 мкг, которые при оптическом контроле выделяли с поверхности полированного шлифа с помощью алмазных и твердосплавных инструментов.

Разложение проб проводили в концентрированной HNO_3 при температуре около 60°C . Из полученного раствора отбирали две аликвоты: 1 — для определения содержаний U и Pb методом изотопного разбавления с использованием смешанного трассера $^{235}\text{U}+^{208}\text{Pb}$; 2 — для измерений изотопного состава общего Pb. В аликвоту 1 трассер добавляли до хроматографического выделения элементов. Для масс-спектрометрического анализа исследуемые элементы выделяли на анионите BIO-RAD AG 1'8, 200–400 меш. Суммарный уровень лабораторного фона при химической подготовке образцов не превышал 0.1 нг для Pb и 0.05 нг для U.

Изотопный анализ выполняли на многоколлекторном термоионизационном масс-спектрометре “Micromass Sector 54”. Для измерения урана использовали трехленточный режим с двумя танталовыми испарителями и рениевым ионизатором. Анализ изотопного состава свинца проводили в одноленточном режиме с силикагелевым активатором на рениевой подложке. Для коррекции результатов на масс-фракционирование

изотопов свинца использовали результаты систематического анализа стандартного образца свинца SRM 981. Правильность конечных результатов контролировали по анализам международных стандартных образцов Pb (SRM 983) и U (U 500), выпущенных Национальным институтом стандартов и технологий США. Итоговая погрешность определения отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ не превышала 0.7 и 0.8% соответственно. Погрешности отвечают 95%-му доверительному уровню. Обработка экспериментальных данных проводилась по программам “PbDAT” и “ISOPLOT” [13, 14]. В геохронологических расчетах использовали значения констант, рекомендованные Международной подкомиссией по геохронологии МГК [15].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отмеченная выше минералогическая неоднородность настурана отражает сложность геохимической истории руд и во многом предопределяет их изотопную неоднородность. Опыт наших предыдущих исследований показал, что существует корреляция изотопных данных с оптически контролируемой минералогической неоднородностью урановых руд [6–11]. В ряде случаев разброс изотопных дат по серии проб настурана одного возраста связан с присутствием в исследуемых образцах включений свинецсодержащих минералов (сульфидов, карбонатов, оксидов и др.), обогащенных радиогенными изотопами ^{206}Pb и ^{207}Pb [11, 12]. Данные об изотопном составе свинца таких минералов имеют ключевое значение при оценке изотопного состава примесного свинца, коррекция на который

Таблица 1. Результаты изучения настурана из рудопроявления Натали

№	Содержание, вес. %													Сум- ма
	Bi ₂ O ₃	CaO	UO ₂	Y ₂ O ₃	FeO	SO ₃	ThO ₂	SiO ₂	ZrO ₂	PbO	Al ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	TiO ₂	
2	0.09	0.58	88.28	0.18	0.00	0.20	0.00	0.15	0.00	5.49	0.02	0.33	0.13	95.46
3	0.22	0.47	88.86	0.25	0.04	0.75	0.03	0.12	0.05	6.44	0.00	0.30	0.11	97.64
5	0.00	0.39	88.98	0.13	0.07	0.30	0.00	0.10	0.00	5.57	0.00	0.42	0.10	96.05
6	0.37	0.29	90.89	0.31	0.71	0.02	0.00	2.10	0.01	4.40	0.92	0.21	0.08	100.32
7	0.15	0.73	88.51	0.16	0.23	0.03	0.03	0.56	0.00	4.93	0.09	0.34	0.10	95.86
8	0.28	0.62	87.80	0.21	0.47	0.08	0.07	0.61	0.03	5.09	0.14	0.25	0.08	95.79
9	0.06	0.27	90.88	0.23	0.66	0.01	0.00	0.20	0.00	4.88	0.01	0.18	0.07	97.46
10	0.31	0.94	88.38	0.24	0.19	0.16	0.01	0.43	0.03	5.17	0.05	0.30	0.19	96.41
11	0.29	0.06	45.14	0.00	0.20	0.27	0.00	9.65	0.01	35.37	0.07	0.08	0.00	91.14

Примечание. Определения выполнены в ИГЕМ РАН С.Е. Борисовским на рентгеновском микроанализаторе “JXA-8100”.

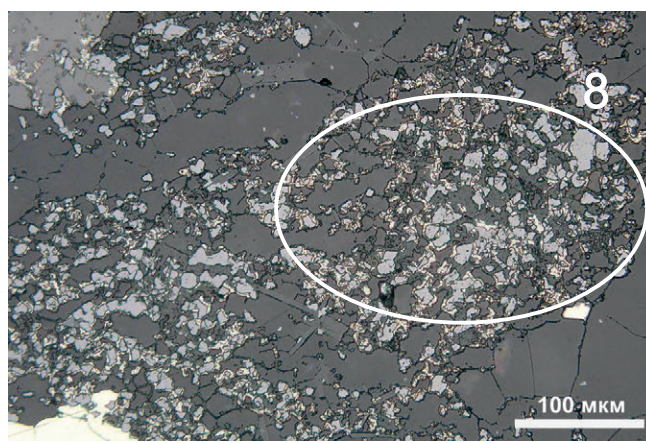
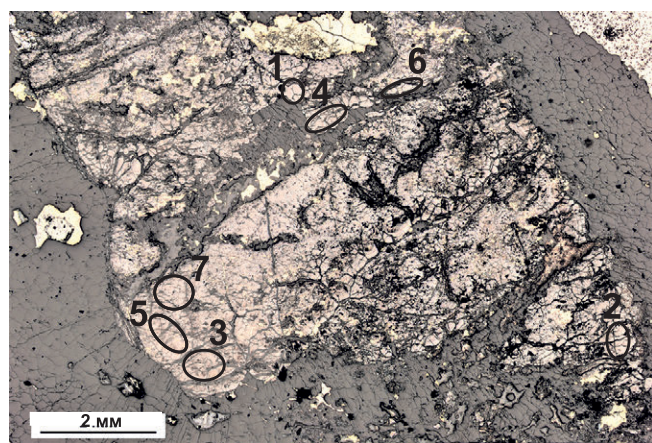


Рис. 3. Рудопроявление Натали. Участки отбора проб настурана для U–Pb датирования околнурены эллипсами. Цифры рядом с эллипсами отвечают номеру пробы в табл. 2. Пробы 1–7 отобраны из почковидных образований настурана, а проба 8 — из тонковкрапленных выделений настурана в карбонате.

вводится при расчете отношений $^{206}\text{Pb}_{\text{рад}}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}_{\text{рад}}/^{235}\text{U}$ индивидуальных проб настурана. Измерения изотопного состава свинца в пробах галенита из образца Натали (табл. 2) показали присутствие в нём значительной доли радиогенной компоненты ($^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}_{\text{рад}}$) — 35.9%. Образование этого минерала, ассоциирующего с настураном, происходило в ходе гидротермального процесса, приведшего к формированию урановой минерализации.

На рис. 3 показаны участки настурановой линзы на которых проводили отборку проб настурана, а в табл. 2 приведены результаты U–Pb изотопного изучения этих проб.

Существенные различия значений U–Pb изотопного возраста по разным пробам настурана (см. табл. 2) свидетельствуют о незамкнутости

его U–Pb изотопной системы. На диаграмме с конкордией (рис. 4), которая представляет собой основной вариант графической обработки данных по пробам с незамкнутой уран-свинцовой системой, точки проб настурана хорошо аппроксимируются прямой или дискордией при СКВО = 1.01. Пересечения дискордии с конкордией отвечают возрасту основных событий в геологической истории настурана. Верхняя точка пересечения отвечает значению 422 ± 4 млн лет и определяет время образования настурана, (силур, пржидольская эпоха), а нижняя — 44 ± 38 млн лет в пределах погрешности указывает на современный возраст процесса нарушения уран-свинцовой системы настурана.

Данные по изотопному составу свинца галенита могут быть дополнительным источником геохронологической информации. Ранее

Таблица 2. Результаты изотопного U–Pb изучения настурана из рудопроявления Натали

№ образца	Изотопные отношения			Содержание, вес. %		Изотопный возраст, млн лет*	
	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Pb	U	T(206/238)	T(207/235)
N-1	267.35	30.544	37.762	4.039	46.47	397.9	401.1
N-2	140.16	23.515	37.767	7.669	61.87	378.2	383.4
N-3	137.07	23.348	37.773	6.985	56.51	369.5	376.1
N-4	258.84	30.060	37.821	4.023	48.09	378.2	383.5
N-5	151.93	24.168	37.783	6.459	57.22	369.7	376.2
N-6	201.47	26.905	37.764	5.158	52.46	391.2	395.3
N-7	159.90	24.612	37.803	6.944	63.29	374.1	380.4
N-8	170.91	25.223	37.726	3.252	29.56	393.6	397.4

Примечание. * – введена коррекция на изотопный состав свинца галенита: ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb – 55.202, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb – 18.836, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb – 37.711.

на примере урановых месторождений различного возраста и геологического положения было показано [6, 8, 11, 12], что изотопное изучение свинца в галените, клаусталите и других минералах свинца, ассоциирующих с оксидами урана, в ряде случаев позволяет реконструировать хронологию формирования и преобразования урановых руд. По изотопному составу радиогенной компоненты свинца галенита и на основании данных о возрасте настурана (с этим гидротермальным событием связаны экстракция радиогенной компоненты из первичного источника урана и её отложение в форме галенита в ассоциации с настураном) можно оценить возраст источника этой компоненты, используя соотношение (1)

$$\left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{206}\text{Pb}}\right)_r = \frac{\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} - \left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_c}{\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} - \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_c} = \frac{1}{137,88} * \frac{e^{\lambda_5 t} - e^{\lambda_5 t_s}}{e^{\lambda_8 t} - e^{\lambda_8 t_s}}, \quad (1)$$

где (²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb)_r – отношение распространенностей соответствующих изотопов в радиогенной компоненте свинца галенита; ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb – то же в общем свинце галенита; (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_c и (²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_c – то же в нерадиогенной компоненте свинца галенита; t – возраст источника радиогенной компоненты свинца в галените; t_s – возраст отложения в галените свинца из этого источника (он отвечает возрасту гидротермального процесса с которым связано отложение настурана); λ₅ и λ₈ – постоянные распада соответственно ²³⁵U и ²³⁸U.

Рассчитанные значения отношения ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb в радиогенной компоненте свинца галенита равно 0.08805. На основании данных о возрасте

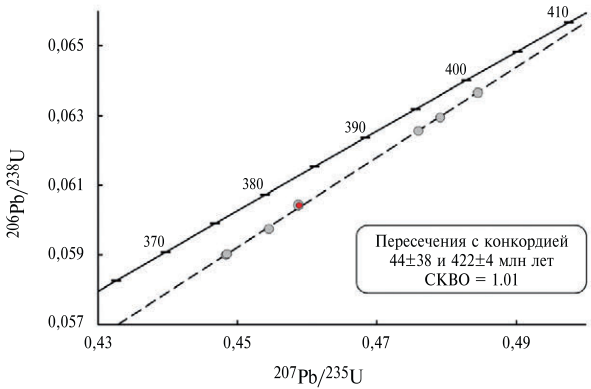


Рис. 4. Диаграмма Аренса–Везерилла с конкордией для проб настурана из рудопроявления Натали. Положение точек проб N-2 (выделено красным цветом) и N-4 на диаграмме практически совпадает.

настурана и отношения ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb в радиогенной компоненте галенитов, используя выражение (1), был рассчитан возраст источника радиогенного свинца в галените – около 1100 млн лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение урановой минерализации рудопроявления Натали показало, что U–Pb система основного уранового минерала – настурана – была нарушена в результате его гипергенного изменения. Это изменение выразилось в развитии вторичных минералов урана и свинца – казолита, кюрита и церуссита. Интерпретация U–Pb данных по 8-ми пробам настурана в рамках модели одноактного эпизодического процесса нарушения U–Pb изотопной системы показывает, что: 1) отложение настурана проходило 422±4 млн лет назад (силур, пржидольская эпоха); 2) возраст процесса нарушения уран-свинцовой системы

настурана в связи с его гипергенным изменением, в пределах погрешности, отвечает современному — 44 ± 38 млн лет. Результаты изучения изотопного состава свинца галенита указывают на присутствие в нем радиогенной компоненты, доля которой в общем изотопном составе свинца галенита составляет около 36%. Эта компонента была экстрагирована 422 ± 4 млн лет назад из древнего докембрийского источника урана с возрастом около 1100 млн лет.

Отметим, что полученное в настоящей работе значение U-Pb возраста настурана из рудопроявления Натали (422 ± 4 млн лет) близко к, полученным различными методами, датировкам на известных месторождениях золота Вернинское (434 ± 4 млн лет) и Голец Высочайший (425 ± 9 млн лет) в Северо-Прибайкальской рудной провинции [16]. Можно полагать, что формирование урановой минерализации связано с тем же тектоническим событием, что и формирование крупномасштабных золоторудных месторождений, а именно, с ранней фазой аккреции структур Байкало-Муйского орогенного пояса к окраине Сибирского кратона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят И.В. Чернышеву за внимание к работе и детальное обсуждение результатов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках НИР ИГЕМ РАН по Государственному заданию FMMN-2024-0031.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машковцев Г. А., Константинов А. К., Мигута А. К. и др. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
2. Макарьев Л. Б., Миронов Ю. Б. Особенности металлогении и перспективы промышленной ураноносности Чуйско-Тонодской минерагенической зоны Северного Забайкалья (по материалам ГК-1000/3 и ГДП-200/2) // Регион. геология и металлогения. 2014. № 57. С. 87–94.
3. Макарьев Л. Б., Ефремова У. С., Крымский Р. Ш., Сергеев С. А. Возраст и стадийность уранового оруденения Туяканского рудного поля (Тонодский район, Северное Забайкалье) // Регион. геология и металлогения. 2019. № 77. С. 67–74.
4. Макарьев Л. Б., Миронов Ю. Б., Ефремова У. С. Геологическая обстановка и возрастные рубежи формирования уранового оруденения Патомского нагорья (Северное Забайкалье) // Разведка и охрана недр. 2020. № 6. С. 9–18.
5. Гребенкин Н. А., Бабкин Н. Я., Карманов Е. Н. и др. Модель докембрийских ураноносных и золотоносных систем Тонодского гранит-метаморфического поднятия (Северное Забайкалье) // Разведка и охрана недр. 2021. № 7. С. 11–21.
6. Чернышев И. В. Уран-свинцовая геохронология процессов формирования и преобразования гидротермальных урановых месторождений // Гидротермальные месторождения урана. М.: Недра, 1978. С. 376–398.
7. Чернышев И. В., Голубев В. Н., Троицкий В. А. и др. Изохронные построения и локализация отбора проб // Масс-спектрометрия и изотопная геология. М.: Наука, 1983. С. 90–108.
8. Голубев В. Н., Чернышев И. В., Агапова А. А. и др. Геохронологическое изучение уранинитов по индивидуальным зернам // Масс-спектрометрия и изотопная геология. М.: Наука, 1983. С. 74–89.
9. Чернышев И. В., Голубев В. Н. Изотопная геохронология процессов формирования месторождения Стрельцовское, Восточное Забайкалье — крупнейшего уранового месторождения России // Геохимия. 1996. № 10. С. 924–937.
10. Голубев В. Н., Кюне М., Потти Б. Фазовый состав и U-Pb изотопные системы настурана кварц-кальцит-настурановых жил месторождения Шлема-Альберода // Геология руд. месторождений. 2000. Т. 42. № 6. С. 513–525.
11. Голубев В. Н., Чернышев И. В. Возраст гидротермальных образований месторождения Восток, (Северо-Казахстанская урановорудная провинция) по данным U-Pb (ID-TIMS), Pb-Pb, Xe_n - Xe_s , K-Ar и Rb-Sr изотопно-геохронологических методов // Геология руд. месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 93–112.
12. Голубев В. Н., Чернышев И. В. Радиогенный свинец в сульфидных минералах урановых месторождений и его геохронологическое значение / Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза: Материалы II Российской конф. по изотопной геохронологии. СПб., 2003. С. 132–135.
13. Ludwig K. R. PbDat for MS-DOS, version 1.21 // U.S. Geol. Survey Open-File Rept. 88–542. 1991b. 35 p.
14. Ludwig K. R. ISOPLOT/Ex. Version 2.06 // A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, CA: Berkeley Geochronology Center (Sp. Publ.), 1999. № 1a. 49 p.
15. Steiger R. H., Jager E. Subcommission on Geochronology: convention on the use of decay constants in

- geo- and cosmochemistry // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1977. V. 36. P. 359–362.
16. Chugaev A. V., Budyak A. E., Larionova Y. O. et al. ⁴⁰Ar–³⁹Ar and Rb–Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) // *Ore Geol. Rev.* 2022. 144. 104855. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104855

HYDROTHERMAL URANIUM MINERALIZATION IN THE TUYUKAN ORE FIELD (NORTHERN TRANSBAIKAL REGION): TIME OF FORMATION OF PITCHBLENDE MINERALIZATION AND AGE OF THE SOURCE OF THE MATTER

V. N. Golubev^{a, #}, N. V. Ledeneva^b, I. V. Rassokhina^a, L. A. Levitskaya^a, A. M. Chepchugov^b

^a*Institute of Geology of Ore deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*N.M. Fedorovskiy All-Russian Scientific Research Institute of Mineral Resources, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: golub238@gmail.com*

Based on the study of local volumes of minerals using classical methods of isotope dilution and thermal ionization mass spectrometry (U–Pb ID TIMS), an isotopic study of pitchblende and galena was carried out at the Natali uranium ore occurrence (Northern Transbaikalia). For the first time, it was shown that pitchblende mineralization at the ore occurrence is Late Silurian (422±4 million years) age. Its formation is associated with early-mid Paleozoic collisional tectogenesis in the area of the Tonod uplift, accompanied by increased fluid activity. The results of analyzing the Pb isotopic composition in galena associated with pitchblende showed that it is enriched in the radiogenic isotopes ²⁰⁶Pb and ²⁰⁷Pb, the source of which was ancient (Precambrian) concentrations of uranium.

Keywords: Tonod uplift, pitchblende, U–Pb (ID TIMS) isotope method, supergene changes, source of ore matter