УДК 550.93:553.495

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

© 2022 г. В. Н. Голубев^{а,} *, И. В. Чернышев^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия *e-mail: golub238@gmail.com Поступила в редакцию 06.10.2021 г. После доработки 27.10.2021 г. Принята к публикации 28.10.2021 г.

Длительность процессов формирования гидротермального оруденения относится к важнейшим генетическим параметрам. Современный облик месторождений определяется не только процессами рудоотложения, но и последующим преобразованием руд. Особое место в геологической истории месторождений занимают процессы предварительного концентрирования рудных компонентов. При изотопно-геохронологическом изучении гидротермальных образований месторождения Восток – самого крупного среди молибден-урановых месторождений Средней Азии и Казахстана – с помощью U-Pb (ID-TIMS) метода установлено, что U-Pb изотопные системы его урановых руд отчетливо запечатлели событие, которое проходило 267 ± 7 млн лет назад. С полученной датировкой согласуются результаты изотопного датирования настурана, околорудных метасоматитов и пострудных кварц-карбонатных жил, полученные с помощью Xe_n-Xe_s, K-Ar и Rb-Sr методов. С этим событием связано образование пострудных кварц-карбонатных жил, экстракция радиогенного свинца из первичных руд (скоплений) урана и его переотложение в разновозрастных сульфидах. В результате отмеченного события первичные урановые руды месторождения Восток утратили свои U–Pb геохронометрические "метки". Информация о возрасте первичных руд сохранилась в виде "замороженных" изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb в переотложенном галените. Данные изучения изотопного состава свинца переотложенного галенита показывают, что образование первичных руд урана, послуживших источником этого свинца (или начального этапа уранового рудообразования), -413 ± 7 млн лет. Оценка времени образования первичных руд месторождения Восток вполне согласуется с нижним пределом возраста этого процесса, который вытекает из недавно полученных (Голубев и др., 2020) U-Pb и Rb-Sr датировок вулканитов и гранит-порфиров (434-424 млн лет), вмещающих руды в Балкашинском рудном поле.

Ключевые слова: Северо-Казахстанская урановорудная провинция, U–Pb, Pb–Pb, Xe_n–Xe_s, K–Ar, Rb–Sr методы датирования, первичные урановые руды и их переотложение **DOI:** 10.31857/S0016777022010026

введение

В начале 1950-х годов в Центральной Азии был установлен ранее неизвестный тип урановых месторождений, связанных с континентальным вулканизмом. Позже месторождения аналогичного типа были открыты в породах различного возраста (от ордовикского до позднемелового) в Казахстане, Забайкалье, Монголии, Китае, США, Латинской Америке и на Дальнем Востоке (Uranium..., 1985). Особый интерес к изучению этих месторождений объясняется тем, что до последнего времени именно они определяли основной потенциал урановорудной промышленности России. В ранних публикациях урановые месторождения в континентальных вулканических поясах были описаны как месторождения "уран-молибденовой" формации или как "месторождения в вулканических депрессиях" (Геология месторождений..., 1966; Гидротермальные месторождения..., 1978). Пространственная приуроченность этой группы урановых месторождений к выходам вулканических пород дала основание для развития представлений о характере связи вулканизма и уранового рудообразования. Месторождение Восток, изотопному датированию которого посвящена настоящая работа, — типичный представитель месторождений "уран-молибденовой" формации. Оно "...является самым значительным объектом среди молибден-урановых месторождений Средней Азии и Казахстана" (Урановые и молибден-урановые..., 2012).

Датирование урановой минерализации этих месторождений осложняется тем, что их основные промышленные руды, сложенные настураном, как правило, характеризуются тонкой минеральной неоднородностью, которая определяется либо наличием включений неурановых минералов в урановой матрице, либо многофазностью самой урановой матрицы. В пределах сравнительно небольших объемов рудных прожилков обычно встречаются различные урановые минералы и их генерации (Дымков, 1973; Дымкова и др., 1983; Рябева, 1982; Текстуры и структуры..., 1977). Их отложение может быть связано с разными стадиями гидротермального минералообразования (Голубев и др., 2008) или даже с разными процессами (Чернышев и др., 2019). Интервал времени, разделяющий отложение разных генераций и фаз vpановых минералов в одних случаях практически не превышает погрешность измеренного U-Рь возраста (первые миллионы лет) (Андерсон и др., 1988), а в других – составляет несколько десятков или даже сотен миллионов лет (Hills, Richards, 1976; Голубев и др., 1983; Андерсон и др., 1983; Golubev et al., 2006; Голубев и др., 2008).

Неоднородность урановых руд может возникать как в процессе их формирования, так и в результате эпигенетического преобразования. Она отражает сложность геохимической истории руд и во многом предопределяет их изотопную неоднородность. Неоднородность может быть следствием изменения состава минералообразующих растворов в процессе первичного отложения настурана (сингенетическая неоднородность) или возникать в результате его последующего преобразования (эпигенетическая неоднородность). Опыт наших ранних исследований показал, что существует корреляция изотопных данных с оптически контролируемой минералогической неоднородностью урановых руд (Чернышев, 1978; Чернышев и др., 1983; Голубев и др., 1983; Чернышев, Голубев, 1996; Голубев и др. 2000). Для понимания причин изотопной гетерогенности урановых руд важное значение имеют результаты изучения тонкой, слабо проявленной минералогической неоднородности настурана, которая, как правило, обусловлена вариациями элементного состава минерала (Голубев и др., 2008; Голубев, 2011). Она часто не находит отчетливого отражения в его оптических характеристиках, а устанавливается только при изучении образцов с помощью высокоразрешающих электронных микроскопов.

В ряде случаев разброс изотопных дат связан с присутствием в исследуемых образцах тонких включений свинецсодержащих минералов (сульфидов, селенидов, теллуридов, оксидов), обога-

шенных радиогенными изотопами ²⁰⁶Pb и ²⁰⁷Pb. Данные об изотопном составе таких минералов имеют ключевое значение при оценке возможных источников вещества. Принципиально возможны два источника радиогенной компоненты свинца в этих минералах: 1) эндогенный, участвовавший в формировании урановой минерализации: 2) собственно урановые минералы месторождения, в которых, спустя определенный промежуток времени после их отложения, произошло перераспределение накопленного радиогенного свинца. При этом экстракция радиогенного свинца могла происходить в течение последующих стадий гидротермального процесса или в результате проявления нового этапа гидротермальной деятельности через значительный промежуток времени. В общем случае на каждой стадии гидротермального процесса возможно появление радиогенного свинца из различных источников.

О наличии самостоятельных минеральных фаз радиогенного свинца в урановых смолках упоминалось еще в работе (Eckelman, Kulp, 1957). Это явление было интерпретировано как результат экстракции и переотложения свинца, накопленного в урановых минералах, и послужило основой для определения времени метаморфизма и преобразования урановых руд. Последующие изотопногеохронологические работы (Koeppel, 1968; Hills, Richrds, 1976), в частности наши исследования урановых месторождений (Чернышев, Голубев, 1996; Golubev, Chernyshev, 2003; Голубев, Чернышев, 2003; Голубев и др., 2008; Чернышев и др., 2017), показали широкий масштаб и разнообразие указанного явления. Эта особенность поведения изотопов свинца на урановых месторождениях, отражая нарушенность U-Pb систем оксидов урана, осложняет их изотопное датирование. В то же время, при постановке детального U-Pb и Pb-Рь изучения конкретных месторождений, указанное явление может служить источником ценной геохронологической и генетической информации. От определения причин возникновения и источников радиогенного свинца в таких фазах решающим образом зависит геохронологическая интерпретация результатов U-Pb изотопного изучения руд.

Оценка возраста уранового оруденения в Северо-Казахстанской рудной провинции, в том числе на месторождениях Балкашинского рудного поля (БРП), в пределах которого находится месторождение Восток, основана на соотношении руд или рудосопровождающих гидротермальных образований с разновозрастными породами. Определение нижней возрастной границы урановорудного процесса базируется на фактах локализации некоторых рудных тел Балкашинского и Тушинского месторождений в кварцевых порфирах и фельзитах – наиболее поздних магматических образованиях этой территории. Возраст этих пород, вплоть до недавнего времени считали раннесреднедевонским (Урановые и молибден-урановые..., 2012). Однако согласно результатам U-Pb-, Rb–Sr- и K–Ar-датирования, опубликованным в работе (Голубев и др., 2020), возраст кварцевых порфиров и фельзитов отвечает границе раннего и позднего силура (кварцевые порфиры) и позднему силуру (фельзиты). Верхняя возрастная граница урановорудного процесса – не моложе позднего девона – определяется тем, что в нижнекаменноугольных и более молодых отложениях не установлены гидротермальные изменения, характерные для всех урановорудных полей Северного Казахстана. Отсюда следует, что образование урановых руд в БРП и конкретно на месторождении Восток могло проходить не раньше позднего силура и не позже позднего девона. Представленные в настоящей работе результаты изотопно-геохронологического изучения (U-Pb (ID-TIMS), Pb-Pb, Xe_n-Xe_s, K-Ar и Rb-Sr) гидротермальных образований на месторождении Восток свидетельствуют о его сложном и длительном формировании.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ БАЛКАШИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОСТОК

Балкашинское рудное поле (БРП) расположено между двумя крупными геологическими блоками – Кокчетавским кристаллическим массивом и Калмыккульским синклинорием. Геологическим изучением этого района занимались Е.П. Сонюшкин, Б.А. Масягутов, Б.И. Омельяненко, Г.А. Ведешкин, С.И. Дарвин, Г.П. Полуаршинов и другие геологи. Результаты их исследований обобщены в монографии (Урановые и молибден-урановые..., 2012), в которой также охарактеризованы гидротермальные образования БРП. Территория рудного поля представляет собой полосу северо-западного простирания, протягивающуюся на 15 км (фиг. 1). Она примыкает к юго-западной границе Новокронштадской наложенной мульды, выполненной вулканогенными, вулканогенно-осадочными породами и красноцветными конгломератами с прослоями песчаников. Мульда приурочена к узлу пересечения Балапанского (или Главного северо-западного) и Порфиритового разломов с Кутунгузской зоной меридиональных разломов. Часть мульды, ограниченная этими разломами, образует кальдеру проседания. Самые древние породы в пределах рудного поля находятся в его северо-западной части. Они представлены двумя толщами раннесреднеордовикского возраста: терригенной (песчаники, алевролиты и аргиллиты) и кремнисто-яшмовой (кремнистые сланцы, яшмы и яшмокварциты). Юго-западную часть рудного поля занимают терригенно-осадочные флишеподобные средневерхнеордовикские отложения. Среди них выделяют нижнюю (аргиллитовую) и верхнюю (песчаниковую) толщи. Широко развитые в районе рудного поля породы позднеордовикского Зерендинского магматического комплекса представлены гранитоидами главной фазы, а также диоритами, габбро и габбродиоритами ранней фазы.

Пространственно основные месторождения БРП связаны с краевой юго-западной частью Новокронштадтской мульды и тяготеют к зонам крупных разрывных нарушений (см. фиг. 1). Рудные тела сосредоточены в терригенно-осадочных средневерхнеордовикских отложениях (месторождения Восток, Звездное и северная часть Тушинского месторождения) и в вулканогенных породах, выполняющих мульду (месторождения Балкашинское и Центральная часть Тушинского).

Месторождение Восток приурочено к участку усложнения морфологии Балапанского разлома, которое вызвано изменением его простирания и падения. На месторождении известны две рудные залежи: Главная и Северо-Западная, которые имеют единый корень на глубине около 700 м от поверхности. Залежи контактируют с основным швом Балапанского разлома и располагаются в его висячем боку, в ордовикской аргиллитовой толще. Они представляют собой совокупность множества мелких прожилков настурана, приуроченных к трещинам различной ориентировки и происхождения. Большинство настурановых прожилков развивается по плоскостям сланцеватости.

ГИДРОТЕРМАЛЬНОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ВОСТОК

Гидротермальный процесс в БРП начался с метасоматического изменения пород – березитизации. Она широко захватила ордовикские флишоидные породы, вызвав наиболее интенсивные изменения этих пород в зонах рассланцевания вблизи Балапанского разлома. По другую сторону разлома в красноцветных грубообломочных и вулканогенных породах изменения проявлены только непосредственно у контакта с разломом, затухая на расстоянии около 20 м от него. Внутренние зоны березитизированных пород состоят преимущественно из серицита и карбоната с небольшим количеством кварца.

Послеберезитовые гидротермальные образования по составу, формам и последовательности выделения (отложения) делятся на четыре группы: 1 – пиритовые и кварц-карбонат-пиритовые прожилки; 2 – настурановые и настуран-карбонатные прожилки; 3 – анкеритовые жилы и брекчии; 4 – кварц-карбонатные жилы. Представленная на фиг. 2 схема последовательности

2022



Фиг. 1. Схематическая геологическая карта Балкашинского рудного поля. Составлена по материалам РУ-1 ЦГХК и Б.А. Масягутова; с учетом данных работы (Голубев и др., 2020). 1 – красноцветные конгломераты с прослоями песчаников, D_{2-3} ; 2 – фельзиты, S_2 ; 3 – кварцевые порфиры, S_{1-2} ; 4 – туфы, туфоконгломераты и туфопесчаники; 5 – красноцветные конгломераты и песчаники; 6 – гранитоиды главной фазы Зерендинского магматического комплекса, O_3 – S_1 ; 7 – диориты, габбро и габбродиориты ранней фазы Зерендинского магматического комплекса, O_3 – S_1 ; 7 – диориты, габбро и габбродиориты ранней фазы Зерендинского магматического комплекса, O_3 – S_1 ; 8 – аргиллиты, алевролиты и песчаники, O_{2-3} ; 9 – кремнисто-терригенные толщи, O_{1-2} ; 10 – разрывные нарушения: I–I – Балапанский (Главный северо-западный) разлом, II–II – Порфиритовый разлом, III–III – Флюоритовый разлом, IV–IV – Кутунгузский разлом, V-V – Фельзитовый разлом. 11 – месторождения урана: мелкие (а) и крупные (б); 1 – Балкашинское, 2 – Восток, 3 – Звездное, 4 – Тушинское.

минералообразования на месторождении Восток составлена на основании детальных минералогических исследований, проводившихся Ю.М. Дымковым, Н.И. Волковым и А.В. Тимофеевым (Дымков и др., 1974; Текстуры и структуры..., 1977; Урановые и молибден-урановые..., 2012), а также результатов собственных наблюдений авторов настоящей статьи.

Рассмотренные ниже минеральные ассоциации характеризуют лишь отдельные эпизоды процесса минералообразования на месторождении Восток. Такая фрагментарность изложения объясняется тем, что задача авторов — показать, какое положение в относительной последовательности формирования минералов занимают те из них, по которым выполнялось настоящее изотопное исследование.

Один из главных минералов пиритовой стадии – пирит 1 (цифрой здесь и далее обозначены генерации минерала), образующий мономинеральные прожилки и гнездообразные выделения в доломите 1. Промышленные концентрации рудных минералов связаны со следующей, настурановой стадией минералообразования. Отложение рудных прожилков сопровождалось развитием в породах флишоидной толщи Са-Fe-Mg-карбонатов и хлоритов. Настурановые прожилки чаще всего ориентированы по сланцеватости пород. Их мощность обычно не превышает 1.5 см, протяженность колеблется от десятков сантиметров до первых метров. Прожилки другой ориентировки имеют прихотливую форму и резко изменяющуюся мощность (от первых миллиметров до 2 см). Их протяженность, как правило, не более 1.5 м. Основные промышленные руды месторождения представлены настураном 1 и настураном 2. Настуран 1 тесно ассоциирует со сложным сульфидом молибдена (Мо-сульфид), в котором отмечаются высокие содержания Fe и Pb (табл. 1), образуя с ним агрегаты мозаичного облика (фиг. 3а). Соотношение этих фаз даже в пределах одного прожилка может меняться в очень широком диапазоне. Участки с различным соотношением настурана 1 и Мо-сульфида обычно ориентированы параллельно зальбандам прожилков. Рентгеновская дифракционная картина Мо-сульфида очень расплывчата: наиболее характерные для молибденита линии лишь едва намечаются. Особенности



Фиг. 2. Схема последовательности минералообразования на месторождении Восток.

состава и структуры этого минерала не позволяют идентифицировать его с молибденитом в том понимании, которое дается в справочной литературе. Сульфидам молибдена близкого состава с несовершенной решеткой даются разные названия: иордизит (Meixner, 1950; Stamples, 1951); фемолит (Скворцова и др., 1964; Дара и др., 1977); железистый молибденит (Мельников и др., 1978).

На настуран 1 нарастает и пересекает его настуран 2, чаще всего не содержащий Мо-сульфид (фиг. 3б). Настуран 2 тесно ассоциирует с хлоритом, который выполняет трещинки усадки в настуране 2 и частично внутренние зоны его прожилков, имеющих симметричное строение. В тех же трещинках, наряду с хлоритом, отмечаются редкие мелкие выделения галенита 2, сфалерита и твердого битума. В самом же настуране 2 галенит (галенит 1) на отдельных участках образует тонкую вкрапленность. Отложением настурана 2 завершилось формирование основных рудных концентраций на месторождении Восток. Дальнейшее развитие гидротермального процесса привело к образованию карбонатных и кварц-карбонатных жил и прожилков и частичному переотложению в них урана.

Наиболее раннее (после образования настурана 2) отложение минералов урана связано с развитием анкерита буровато-зеленых и бурых оттенков, которое проходило в течение карбонатной стадии гидротермального процесса. На участках пересечения и замещения анкеритом рудных прожилков в нем отмечается настуран 3, который формирует тонкие (не более 0.02 мм) выделения в интерстициях зерен анкерита (фиг. 4). Характер развития настурана 3 дает основание считать, что его образование связано с процессом переотложения настурана первых двух генераций. На отдельных участках настуран 3 представлен более крупными (до 0.1 мм) стяжениями неправильной формы. В местах пересечения рудных прожилков анкеритом в последнем неоднократно были установлены мелкие (не более 0.05 мм) выделения галенита 3. На других участках галенит в этом анкерите не встречен. Отмеченный характер локализации галенита 3 дает основание считать, что он образовался преимущественно из свинца, экстрагированного из урановых минералов.

Гидротермальная деятельность на месторождении Восток завершилась образованием многочисленных кварц-карбонатных жил, линз и прожилков. Одними из первых в этот период гидро-

ГОЛУБЕВ, ЧЕРНЫШЕВ

№ образца и место	Точка	Содержание, % ат.							
его отбора	опробования	As	Fe	Мо	S	Pb	U	Ca	Сумма
	1	0.77	8.91	26.87	60.11	2.64	0.02	0.49	99.81
	2	1.11	10.28	26.09	59.50	2.27	0.07	0.46	99.78
	3	1.11	9.54	26.52	59.84	2.27	0.08	0.41	99.77
V-698/1	4	0.76	9.08	27.28	60.04	2.29	0.01	0.38	99.84
Гор. +180, орт 321	5	0.68	9.20	25.60	60.84	3.00	0.01	0.45	99.78
	6	0.78	11.42	25.64	59.83	1.43	0.28	0.40	99.78
	7	1.02	9.39	26.86	60.49	1.75	0.03	0.25	99.79
	8	0.58	13.83	24.53	59.05	1.26	0.03	0.34	99.62
	13	0.84	9.27	27.07	61.05	1.03	0.15	0.33	99.75
	14	0.89	9.16	27.08	61.54	0.88	0.00	0.27	99.82
V-969/578	15	0.89	9.14	27.41	60.98	1.05	0.01	0.34	99.81
Скв. 969,	16	0.80	9.93	26.28	61.63	0.88	0.00	0.27	99.80
инт 578 м	17	0.85	9.43	26.57	61.77	0.90	0.01	0.23	99.76
	18	0.85	9.21	27.36	61.24	0.73	0.00	0.40	99.79
	19	0.80	9.37	27.60	60.80	0.76	0.00	0.46	99.80
	21	1.26	6.89	26.68	61.29	3.33	0.03	0.37	99.85
N 000 /1	22	1.14	6.01	27.46	61.74	3.06	0.04	0.46	99.90
V-902/1 Гор. +30, орт 607	24	1.41	7.16	26.07	61.47	3.17	0.19	0.39	99.85
	25	1.52	5.38	26.32	60.93	4.38	0.37	0.90	99.80
	26	1.25	5.10	25.51	62.27	4.96	0.09	0.43	99.63

Таблица 1. Результаты определения состава Мо-сульфида из урановых руд с месторождения Восток

Примечание. Изучение образцов проводили в ИГЕМ РАН на электронном микрозонде ЈХА 8200 (аналитик В.И. Таскаев).

термальной деятельности формировались кварцкарбонатные жилы со слюдистыми минералами. Жилы весьма разнообразны по размерам, форме и ориентировке. Мощность их может достигать 20–25 см, а протяженность (в случае развития вдоль крупных нарушений) – нескольких метров. Однако чаще всего размеры почти на порядок меньше. Вслед за кварц-карбонат-слюдистыми жилами формировались жилы и прожилки, сложенные розовым анкеритом и кварцем. В призальбандовых зонах этих образований, на участках пересечения ими рудных зон, встречаются относительно редкие включения галенита 4, размер которых не превышает 1.5 мм.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изотопно-геохронологическое изучение гидротермальных образований месторождения Восток U–Pb, Rb–Sr и K–Ar методами в рамках настоящей работы проводили в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН при участии А.А. Агаповой, М.М. Аракелянц, Э.Д. Баировой, Ю.В. Гольцмана, А.В. Ереминой, В.А. Троицкого и Н.К. Щербининой.

U–Pb (ID-TIMS) метод

Анализировали микропробы настурана массой 1–15 мкг, которые при оптическом контроле выделяли с поверхности полированных шлифов с помощью алмазных и твердосплавных инструментов (табл. 2).

Разложение проб проводили в концентрированной HNO_3 при температуре около 60°С. Из полученного раствора отбирали две аликвоты: 1 – для определения содержаний U и Pb методом изотопного разбавления с использованием смешанного трасера ²³⁵U + ²⁰⁸Pb; 2 – для измерений изотопного состава общего Pb. В аликвоту для определения содержаний U и Pb трасер 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 термоионизационных масс-спектрометрах МИ-1320 и Sector 54. Для измерения урана на масс-спектрометре МИ-1320 использовали двухленточный режим с воль-



Фиг. 3. Строение настурановых прожилков. а – мозаичная структура настуран-Мо-сульфидного агрегата: Nt – настуран, Мо – Мо-сульфид; б – почковидные корки настурана 2 (Nt 2) нарастают на настуран 1 (Nt 1) и пересекают его.

фрамовым испарителем и рениевым ионизатором, а на масс-спектрометре Sector 54 — трехленточный режим с двумя танталовыми испарителями и рениевым ионизатором. Анализ изотопного состава свинца на обоих масс-спектрометрах проводился в одноленточном режиме с силикагелевым активатором на рениевой подложке. Коррекция на масс-фракционирование изотопов свинца велась по результатам систематического анализа стандартного образца свинца SRM 981. Корректирующий фактор составил 1.0008 на единицу разности масс изотопов свинца. Правильность конечных результатов контролировали по данным анализов международных стандартных образцов Pb (SRM 983 и SRM 981) и U (U 500) Национального института стандартов и технологий (США). Итоговая погрешность определения отношений ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U не превышала 0.6 и 0.7% соответственно, а ²³⁸U/²⁰⁴Pb и ²³⁵U/²⁰⁴Pb – 1%. Погрешности отвечают 95-процентному доверительному уровню. Обработка эксперимен-



Фиг. 4. Развитие настурана 3 (Nt 3) на участке замещения настурана 2 (Nt 2) бурым анкеритом (Ank).

тальных данных проводилась по программам Pb-DAT и ISOPLOT (Ludwig, 1991; Ludwig, 2003). В геохронологических расчетах использовали значения констант, рекомендованные Международной подкомиссией по геохронологии МГК (Steiger, Jager, 1977).

Rb-Sr метод

Разложение проб силикатных пород и минералов проводили в растворе смеси концентрированных HF и HNO₃ в соотношении 5:1 в присутствии смешанного трасера 85 Rb + 84 Sr. Хроматографическое выделение Rb и Sr выполняли с использованием ионнообменной смолы DOWEX 50×8. Для изотопного анализа рубидия использовали двухленточный источник ионов. Испарителем и ионизатором служили ленточки из тантала. При изотопном анализе стронция использовали одноленточный режим ионизации на окисленном тантале, что позволило практически исключить влияние фонового тока рубидия на получаемые результаты. Измерения начинали после спада интенсивности ионного тока рубидия до уровня, соответствующего вкладу ⁸⁷Rb в ⁸⁷Sr менее 0.002%. Рабочая температура измерений 1350-1400°С. Суммарный уровень лабораторного фона при химической подготовке образцов не превышал10 пг для Rb, и 150 пг для Sr. Воспроизводимость результатов измерения отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (26) не превышала 0.005%. Измеренные значения приводили к результатам текущих анализов стандартного образца Sr SRM-987.

К—Аг метод

Содержание радиогенного аргона определяли методом изотопного разбавления с применением в качестве трасера моноизотопа ³⁸Ar. Выделение и очистку аргона из образцов проводили с помощью выделительной установки АУ-4М. Изотопный анализ аргона выполняли на масс-спектрометре МИ-1201. Примесь воздушного ⁴⁰Ar в опытах составляла 20-30% от общего количества 40 Ar. Точность измерений аргона контролировали измерением содержания аргона в эталонных пробах, а также измерением изотопного состава воздушного аргона. Содержание калия определяли методом пламенной фотометрии. Точность опрелеления K-Ar возраста, зависевшая от особенностей образца и условий анализа для конкретных образцов, приведена в табл. 5.

Xe_s — Xe_n метод

Определения Xe_s—Xe_n методом возраста настурана из месторождения Восток были выполнены А.П. Мешиком в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского. Физические основы и методика определения возраста урансодержащих минералов Xe_s—Xe_n методом изложены в работе (Shukolukov, Meshic, 1987). Средняя случайная погрешность измерения изотопных отно-

№ образца и место	No mooti-	Изотопные отношения					
его отбора	лы проор	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²³⁸ U/ ²⁰⁴ Pb	²³⁵ U / ²⁰⁴ Pb	
	место ра Место ра	1109	74.5	38.521	18921	137.3	
V-661/1	2	943	67.1	Изотлные отношенияPb/ ²⁰⁴ Pb ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb ²³⁸ U/ ²⁰⁴ Pb74.538.5211892167.138.29915179114.638.4903722958.038.47610984194.938.2117049840.638.4532499139.438.26345144129.438.33341817159.138.61254235330.538.531109962372.838.097152204114.438.29216742136.642.409493151019.138.311431082437.238.732192129496.938.524209451102.138.30115525424.937.989169782380.038.882134550630.338.5012624641037.739.18342800684.438.3202818942.138.726678277.938.3912271427.638.590469	110.1		
Гор. +180, орт 323	4	1847	114.6	38.490	37229	270.2	
	1	778	58.0	38.476	ния ²³⁸ U/ ²⁰⁴ Pb 18921 15179 37229 10984 70498 2499 45144 41817 54235 109962 152204 16742 49315 431082 192129 209451 15525 169782 134550 262464 428006 26165 28189 6782 22714 469	79.7	
	1	3328	194.9	38.211	70498	511.6	
N 707 /1	2	450	40.6	38.453	2499	18.1	
$V - \frac{8}{12}$	3	2309	139.4	38.263	45144	327.6	
Гор. +130, орт 408	5	2124	129.4	38.333	41 817	303.5	
	6	2649	159.1	38.612	гношения ¹⁴ Pb ²³⁸ U/ ²⁰⁴ Pb ²³⁵ U/ ²⁰⁴ Pb 11 18921 137.3 19 15179 110.1 10 37229 270.2 16 10984 79.7 1 70498 511.6 13 2499 18.1 13 45144 327.6 13 45144 327.6 14 109962 797.9 17 152204 1104.5 18 109962 797.9 17 152204 1104.5 18 109962 797.9 17 152204 1104.5 19 49315 357.9 11 431082 3128.2 19 192129 1394.2 24 209451 1519.9 11 15525 112.7 19 169782 1232.0 32 134550 976.4 101 262464 1904.6		
	01	5842	330.5	38.531	109962	797.9	
	02	6581	372.8	38.097	152204	1104.5	
№ образца и место его отбора /-661/1 [°] ор. +180, орт 323 /-787/1 [°] ор. +130, орт 408 /-698/1 [°] ор. +180, орт 321	04	1753	114.4	38.292	16742	121.5	
	05	2260	136.6	42.409	49315	357.9	
	08	19005	1019.1	38.311	431082	3128.2	
V-698/1	06	7753	437.2	38.732	192129	1394.2	
Гор. +180, орт 321	07	9096	496.9	38.524	209451	1519.9	
	1-1	1595	102.1	38.301	15525	112.7	
	1-2	7753	424.9	37.989	169782	1232.0	
	1-3	6749	380.0	38.882	134550	976.4	
	1-4	11 412	630.3	38.501	262464	1904.6	
	1-6	19369	1037.7	39.183	428006	3105.9	
	2	1302	84.4	38.512	26165	189.9	
V 702/1	1	1384	88.4	38.320	28 189	204.6	
V - 700/1	5	490	42.1	38.726	6782	49.2	
10p. + 00, 0p1 525	3	1172	77.9	38.391	22714	164.8	
	6	221	27.6	38.590	469	3.4	

Таблица 2. Результаты U–Pb изотопного изучения проб настурана из образцов, отобранных в подземных горных выработках месторождения Восток

шений для количеств ксенона ~ 10^{-11} см³ составляла 0.5%. Для учета систематической погрешности, вызванной изотопной масс-дискриминацией в источнике ионов, применялся газовый эталон Хе атмосферного изотопного состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

U-Pb изотопные системы урановых руд

Изотопное датирование настурана первой и второй генераций существенно осложнялось отсутствием возможности извлечения их в чистом виде. Как уже отмечалось, с ними постоянно ассоциируют сульфиды (Мо-сульфид и галенит) и довольно часто — переотложенные настуран 3 и настуран 4. Последние характеризуются низкими значениями отношения Pb/U, отвечающими кайнозойскому возрасту. Что касается сульфидов, то показали, что чем больше их содержание в пробе, тем выше ее изотопный возраст (фиг. 5). Из этого следует, что сульфиды из гидротермальных образований месторождения содержат аномальный по составу (обогащенный радиогенными изотопами ²⁰⁶Рb и ²⁰⁷Рb) свинец. Переотложенный настуран присутствует, главным образом, на участках развития более поздних карбонатов, поэтому исключить его попадание в пробы можно было путем локальной отборки монолитных микрообъемов настурана. Сульфиды же находятся непосредственно в настурановой матрице, поэтому невозможно избежать их присутствия даже при локальном отборе проб. При этом можно добиться лишь некоторой степени чистоты проб настурана в отношении примесного свинца, присут-

результаты изотопного U–Pb изучения проб настурана с различной примесью этих минералов



Фит. 5. Зависимость значений U–Pb изотопного возраста локальных проб от соотношения в них настурана и Мо-сульфида, выраженное через элементное отношение U/Mo. Результаты изучения индивидуальных образцов: а) обр. V-661/1; б) обр. V-698/1; в) обр. V-787/1.

ствующего в пробах в виде сульфидов, но полностью освободиться от его присутствия не удается.

Необходимые для геохронологических расчетов данные измерений изотопного состава общего Pb и отношения Pb/U, полученные по 24 локальным микропробам, выделенным из четырех образцов настурана, приведены в табл. 2.

С целью исключить или минимизировать искажения изотопного возраста настурановой фазы за счет присутствия сульфидов проводилась изохронная графико-аналитическая модельная обработка изотопных данных в координатах $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ μ $^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. что, по сути дела, представляет собой один из способов коррекции возраста на примесный свинец. Правильность определения возраста настурана и изотопного состава примесного свинца связана с выполнением следующих условий модели: 1) одновозрастность настурана в серии проб, объединяемых изохроной; 2) замкнутость объема U-Pb системы проб с момента кристаллизации настурана и заключенного в нем свинецсодержащего минерала; 3) пробы имеют различное содержание примесного свинца; 4) изотопный состав примесного свинца одинаков в серии проб, объединяемых изохроной.

Рассмотрим выполнимость перечисленных условий изохронной модели применительно к исследуемым образцам.

1. По минералогическим данным настуран первых двух генераций формировался в течение одной стадии минералообразования. Согласно существующим оценкам и расчетам, длительность стадии гидротермального процесса может составлять от нескольких тысяч до одного млн лет (Рундквист и др., 1971; Кигай, 1979; Голубев, 1981; Непгу et al., 1997; Leavitt et al., 2004), т.е. она существенно меньше или сопоставима с аналитической погрешностью изотопного датирования. Следовательно, изотопными методами минералы одной стадии будут определяться как одновозрастные. Это позволяет считать, что при датировании первых двух генераций настурана первое условие изохронной модели выполняется.

2. В качестве свидетельства выполнимости второго условия, по-видимому, можно рассматривать данные определения отношения Pb/U в настуране первой и второй генераций, полученные с помощью электронного микрозонда. Это отношение для замкнутых или в равной степени (в том числе и полностью) "омоложенных" в какое-то время и впоследствии замкнутых U-Pb систем должно оставаться постоянным в любых точках настурана. В подавляющей части изученных на микрозонде полированных шлифов величина Pb/U в настуранах первой и второй генераций варьировала в сравнительно узком интервале – 0.043– 0.054 (табл. 3).

Эти вариации могут объясняться как аналитической погрешностью, так и возможным присутствием в пределах анализируемых участков настурана плохо различимых включений свинецсодержащих сульфидов. Согласно данным, полученным нами при изучении уранинитовой минерализации, в минералах с открытой уран-свинцовой системой соотношение Pb/U весьма существенно отличается не только в разных образцах, но и в пределах единичных кристаллов (Голубев и др., 1983). В

дового а	нализа микрообъемов	з настуранов ранн	их генераций месторождения
Содержание, мас. %		Dh/II(ar)	
J	Pb	F0/0 (al.)	Оценка возраста, млн лет
	Образец 698/1		
.3	3.30	0.047	280
.9	3.38	0.048	290
.7	3.66	0.052	310
.1	3.25	0.046	280
.1	3.04	0.043	260
8	3.01	0.043	260
1	2.24	0.047	200

Таблица 3. Результаты микрозондового анализа BOCTOK

	F		$\mathbf{D}\mathbf{b}/\mathbf{U}$ (or)	Оценка возраста млн лет	
тенерация настурана	U	Pb	10/0 (al.)	Оценка возраста, млн лет	
		Образец 698/1			
1	81.3	3.30	0.047	280	
1	80.9	3.38	0.048	290	
1	80.7	3.66	0.052	310	
2	81.1	3.25	0.046	280	
2	82.1	3.04	0.043	260	
2	81.8	3.01	0.043	260	
2	82.4	3.34	0.047	280	
2	80.3	3.61	0.052	310	
2	81.7	3.30	0.047	280	
2	81.4	3.39	0.048	290	
2	83.0	3.46	0.048	290	
2	81.5	3.48	0.049	300	
	ļ	Образец 661/1	1	1	
1	85.5	3.90	0.053	320	
1	82.7	3.64	0.051	310	
2	85.9	3.85	0.052	310	
2	83.6	3.11	0.043	260	
2	85.4	3.90	0.053	320	
	•	Образец 783/1	•		
2	82.9	3.09	0.043	260	
2	84.9	3.55	0.048	290	
2	81.9	3.21	0.045	270	
2	82.7	3.23	0.045	270	
		Образец 787/1	,	,	
2	84.0	3.39	0.047	280	
2	80.3	3.50	0.050	300	
2	81.1	3.76	0.054	320	

табл. 3 приведена также оценка U-Pb возраста исследуемых микрообъемов настурана, сделанная в предположении, что весь свинец, установленный в них с помощью микрозонда, является радиогенным. Очевидно, что полученный таким образом возраст должен быть выше U-Pb изотопного возраста того же микрообъема настурана, поскольку при расчетах не учитывается примесный свинец. Как видно из табл. 3, значения возраста, рассчитанные по соотношению общих количеств свинца и урана, не превышают 320 млн лет и практически одинаковы для настурана первой и второй генераций. Приведенные данные позволяют считать, что второе условие изохронной модели выполняется.

3. Основная доля примесного свинца в пробах настурана с месторождения Восток содержится в ассоциирующих с настураном сульфидах, поэтому выполнение третьего условия достигалось отборкой в каждом из образцов проб с различной примесью Мо-сульфида и галенита.

4. С целью сведения к минимуму возможных различий в изотопном составе примесного свинца в пробах настурана их отборка для каждой изохронной серии проводилась из отдельно взятого образца, характеризующего лишь небольшой участок настуранового прожилка. Вместе с тем, сами образцы были отобраны из различных прожилков на разных горизонтах месторождения. Таким образом, было получено четыре серии проб из образцов V-661/1, V-698/1, V-783/1 и V-787/1. Вопрос о

№ образца	Индекс пробы	Изотопные о в галенитах	тношения Рb (галенит 3)	Изотопные отношения Pb в примесном свинце настурана по данным изохронных построений		
		206 Pb/ 204 Pb \pm 2 δ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\pm 2\delta$	206 Pb/ 204 Pb \pm 2 δ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\pm 2\delta$	
V-661/1	1л 1н	326 ± 3 326 ± 1	34.6 ± 0.3 34.6 ± 0.2	327 ± 12	34.40 ± 0.76	
V-787/1	46 46-2	340.2 ± 0.4 341.1 ± 0.3	$\begin{array}{c} 35.56 \pm 0.05 \\ 35.67 \pm 0.04 \end{array}$	351 ± 7	34.86 ± 0.30	
V-783/1	1a	194.7 ± 0.7	26.54 ± 0.14	201.5 ± 1.3	26.84 ± 0.77	
V-698/1	1г 1в 2а-1 2а-2 2	$1251 \pm 3 \\ 1273 \pm 5 \\ 717.3 \pm 1.2 \\ 834.4 \pm 3.4 \\ 864.3 \pm 6.5$	92.08 ± 0.21 93.41 ± 0.36 58.59 ± 0.14 66.70 ± 0.27 68.33 ± 0.49	585 ± 580	53 ± 29	

Таблица 4. Результаты изотопного анализа свинца галенитов (галенит 3)

постоянстве изотопного состава примесного свинца и, следовательно, соблюдении четвертого условия изохронной модели в каждой из этих серий обсуждается ниже при рассмотрении аналитических данных. В выбранных для изотопных исследований образцах на небольших участках (не более 1 см²) отмечено наиболее контрастное распределение свинецсодержащих сульфидов в настуране.

Хорошее соответствие экспериментальных точек проб из образцов V-661/1, V-783/1 и V-787/1 линиям регрессии на U-Pb диаграммах (фиг. 6) выражается в низких значениях СКВО (от 0.97 до 4.3), что позволяет говорить о выполнимости для них последнего условия модели, а сами линии регрессии рассматривать как изохроны. Отвечающие им значения возраста находятся в диапазоне 258-279 млн лет. Разброс значений изотопного возраста для изохрон не выходит за пределы суммы погрешностей значений T(²⁰⁶Pb/²³⁸U) и T(²⁰⁷Pb/²³⁵U). Хорошее согласие результатов по изохронам ²³⁸U/²⁰⁴Pb—²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²³⁵U/²⁰⁴Pb— 207 Pb/ 204 Pb, то есть по двум разным U–Pb системам, — важный аргумент в пользу того, что полученные датировки отражают время проявления реального геологического события. Среднее значение возраста, рассчитанное с использованием данных по шести изохронам для этих образцов, составляет 267 ± 7 млн лет. Значения отношений ²⁰⁶Рb/²⁰⁴Рb и ²⁰⁷Рb/²⁰⁴Рb в примесном свинце, определяемые по пересечению изохрон с осью ординат, сушественно выше, чем в обыкновенном свиние. Следовательно, основная часть (более 50%) в изотопном составе примесного свинца, который сосредоточен преимущественно в ассоциирующих с настураном сульфидах, представлена радиогенной компонентой. Результаты прямых измерений изотопного состава свинца галенитов в образцах V-661/1, V-783/1 и V-787/1, приведенные в табл. 4, хорошо согласуются с изотопными отношениями ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb в примесном свинце настурана (по данным изохронных расчетов), что может рассматриваться как дополнительный признак соблюдения четвертого условия модели.

На U-Pb диаграммах, построенных для проб из образца V-698/1 (фиг. 6ж, з), прямые, аппроксимирующие экспериментальные точки, отвечают значениям возраста 268 ± 16 и 272 ± 14 млн лет. Эти значения находятся в том же интервале. который определяет возраст образцов V-661/1, V-783/1 и V-787/1. Однако указанные прямые имеют очень большую погрешность аппроксимации (СКВО равен 248 и 261 соответственно), а изотопные отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb в разных пробах галенита из этого образца существенно отличаются (см. табл. 4). Доля радиогенной компоненты в изотопном составе свинца галенитов из обр. V-698/1 намного выше, чем в галенитах из обр. V-661/1, V-783/1 и V-787/1. Поэтому даже небольшая разница в количестве обыкновенного свинца, захваченного разными зернами галенита при их образовании, могла быть причиной существенных вариаций изотопного состава свинца этих зерен (см. табл. 4). Судя по величинам (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_о и (²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_о в пробах настурана из обр. V-698/1 (фиг. 6ж и 63). доля радиогенной компоненты в изотопном составе примесного свинца этих проб намного выше, чем в обр. V-661/1, V-783/1 и V-787/1. Очевидно, что на различных участках настуранового прожилка, где проводилась отборка проб настурана, как и в разных зернах галенита из этого образца, изотопный состав примесного свинца в пробах мог отличаться из-за



Фиг. 6. Диаграммы изотопных отношений 238 U/ 204 Pb $^{-206}$ Pb/ 204 Pb и 235 U/ 204 Pb $^{-207}$ Pb/ 204 Pb для проб урановых минералов из образцов V-661/1 (а, б), V-783/1 (в, г), V-787/1 (д, е) и V-698/1 (ж, з).

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 64 № 1 2022

No upofiji		Возраст, млн лет						
л⊍ прооы	K, %	Ar, нг/г	Rb, ppm	Sr, ppm	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	K–Ar	Rb-Sr
				Метасом	атиты			
112	3.35 ± 0.04	65.6 ± 1.4	_	—	_	—	264 ± 12	_
69	3.23 ± 0.04	68.4 ± 1.4	_	_	_	—	283 ± 12	_
108	3.43 ± 0.04	71.2 ± 1.5	_	_	_	—	279 ± 12	_
878	3.19 ± 0.04	65.8 ± 1.4	_	_	_	_	275 ± 10	_
94	3.76 ± 0.06	76.5 ± 1.5	_	_	_	—	273 ± 12	_
121	4.84 ± 0.05	97.2 ± 2.0	_	_	_	—	268 ± 10	_
698/1	0.77 ± 0.04	14.7 ± 0.7	_	_	_	—	256 ± 12	_
		1	1	Поздние	жилы			1
136	8.61 ± 0.07	178.5 ± 3.0	306	9.18	94.4 ± 0.3	1.06331 ± 0.00007	272 ± 9	262 ± 2
874	9.05 ± 0.08	183 ± 3	1028	42.6	71.9 ± 0.6	1.00116 ± 0.00030	270 ± 10	278 ± 3
875	7.60 ± 0.06	152 ± 3	910	5.76	575.6 ± 0.7	2.94952 ± 0.00044	268 ± 10	273 ± 1

Таблица 5. Результаты К—Аг и Rb—Sr датирования гидротермальных слюдистых минералов Балкашинского рудного поля

Примечание. По метасоматитам Rb-Sr датирование не проводили.

разницы в количестве захваченного обыкновенного свинца. По-видимому, именно этим и объясняется широкий разброс точек на диаграммах фиг. 6ж и 63. Следовательно, при соблюдении первых трех условий изохронной модели четвертое условие для серии проб из образца V-698/1 не выполняется.

Дополнительная геохронологическая информация для настурана из этого образца, а также для настурана из образцов V-661/1 и V-787/1 получена в результате их Xe_s-Xe_n датирования. Показания этого геохронометра не зависят от содержания и изотопного состава примесного свинца в пробах (Shukolukov, Meshic, 1987). Две пробы из образца V-698/1 с резко различным соотношением настурана и Мо-сульфида (1:1 и 15:1) дали практически одинаковые значения Xe_s-Xe_n возраста – 256 ± ± 20 и 262 ± 15 млн лет соответственно (фиг. 7). Не отличается от них и K–Ar датировка – 256 \pm \pm 12 млн лет, полученная по пробе, отобранной из зоны интенсивно измененных аргиллитов непосредственно на контакте с настурановым прожилком V-698/1. Примерно такие же значения Xe_s-Xe_n возраста показали пробы настурана из образцов V-661/1 (255 ± 20 млн лет) и V-787/1 (250 ± 15 млн лет).

Хорошая сходимость значений U–Pb возраста по изохронам на диаграммах $^{238}U/^{204}Pb-^{206}Pb/^{204}Pb$ и $^{235}U/^{204}Pb-^{207}Pb/^{204}Pb$ для серий проб из каждого отдельного образца и между разными образцами, а также согласие с ними (в пределах погрешностей определений) значений Xe_s-Xe_n возраста настурана из тех же образцов, позволяют считать, что полученные датировки отражают время проявления реального геологического события. Наиболее вероятными представляются следующие два варианта его интерпретации. Согласно первому, в раннепермское время происходило формирование настурана первых двух генераций; присутствующий в ассоциирующих с настураном сульфидах сильно аномальный по изотопному составу свинец привнесен вместе с ураном в зону рудоотложения. Высокая степень аномальности свинца указывает, что он извлекался из источника с концентрациями урана, сопоставимыми с теми, которые отмечаются в урановых рудах. Другой возможный сценарий предполагает, что в пермское время имела место гомогенизация изотопного состава свинца в ранее образованных рудных прожилках. В ходе этого процесса из настурана был экстрагирован накопленный радиогенный свинец и переотложен в сульфидах. В каждом из вариантов предполагается участие первичных, более древних скоплений урана (или первичных руд), служивших источником радиогенного свинца, переотложение которого происходило в пермское время. Следовательно, наряду с пермским событием, в истории месторождения имело место событие, с которым связано отложение первичных руд (скоплений урана), послуживших в дальнейшем источником радиогенного свинца в примесном свинце настурана 1 и настурана 2. Геологическая интерпретация этих событий только на основании данных изучения рудных прожилков допускает, как отмечалось ранее, различные варианты. Необходимость более определенной геологической интерпретации U-Рь данных обусловила проведение дополнитель-



Фиг. 7. Возрастные спектры и дифференциальная потеря Xe в пробах настурана из образцов V-661/1 (a), V-787/1 (б) и V-698/1 (в, г). Соотношение настурана и Мо-сульфида в пробах из образца V-698/1 резко отличается: B - 1 : 1, r - 15 : 1.

ных изотопных исследований, результаты которых рассматриваются далее.

Данные K—Ar и Rb—Sr датирования слюдистых минералов из гидротермальных образований

Для получения дополнительных изотопно-геохронологических данных по гидротермальным образованиям БРП было проведено изучение околорудных метасоматитов и поздних кварц-карбонатных жил, содержащих светлые калиевые слюды. При отсутствии высокотемпературных воздействий изотопные системы этих слюд вполне устойчивы. Отмеченное обстоятельство создавало предпосылки для получения изотопных возрастных характеристик разных стадий гидротермального минералообразования. По околоруд-

ным метасоматитам получены только K-Ar датировки. Отборка проб метасоматитов проводилась из зон серицитизации в кварцевых порфирах (пробы 112, 69, 108 и 878) и фельзитах (пробы 94 и 121). Минеральный состав таких проб довольно однороден. Это - агрегат тонкодисперсных кварца и серицита в соотношении, близком к единице, что объясняет относительно низкое содержание калия в пробах (табл. 5). Их фазовый состав подтверждается данными рентгеноструктурного анализа. В пробе околорудноизмененных аргиллитов V-698/1 отмечается почти полное замещение первичных минералов породы новообразованными серицитом, кварцем и карбонатом; доля серицита в пробе составляет около 15%. Как видно из табл. 5, K-Ar возраст околорудных метасоматитов вне зависимости от типа исходных пород, подвергшихся изменению, отвечает пермскому времени и практически не отличается от U-Pb изохронной датировки настурана первых двух генераций.

В исследуемых образцах из поздних жил и прожилков светлая слюда диагностирована как мусковит (политип 2M₁). Средний размер чешуек мусковита – 1.5–2.0 мм. Обычно они сосредоточены в агрегатах неправильной или прожилковидной форм. Сравнительная простота выделения таких агрегатов позволила отобрать мономинеральные фракции мусковита, по которым были получены K-Ar и Rb-Sr данные (см. табл. 5). При расчете Rb-Sr возраста изотопное отношение ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в стронции, захваченном при кристаллизации мусковитов. принималось равным этому изотопному отношению в карбонатах, присутствующих в тех же жилах. Значения K-Ar и Rb-Sr возраста мусковитов вполне удовлетворительно согласуются между собой и находятся в том же интервале геохронологической шкалы, которому соответствовали изотопные датировки метасоматитов и руд. Исследуемые жилы относятся к наиболее поздним гидротермальным образованиям на месторождении и не несут следов позднейшего гидротермального воздействия. Согласие значений возраста по разным изотопным системам образцов, отобранных из разных поздних жил, дает основание считать полученные значения соответствующими времени формирования жил. В качестве еще одного свидетельства пермского возраста минеральных образований поздней стадии можно рассматривать тот факт, что на участках пересечения ими настурановых прожилков изотопный состав свинца галенитов. присутствующих в поздних жилах и прожилках, идентичен изотопному составу примесного свинца в настуране.

Изотопный состав свинца сульфидов и хронология формирования урановых руд

Отмеченная ранее высокая степень аномальности примесного свинца показывает, что он извлекался из источника с концентрациями урана, сопоставимыми с теми, которые присущи урановым рудам. Следовательно, наряду с пермским событием, в истории формирования месторождения имело место событие, с которым связано отложение первичных скоплений урана, послуживших в дальнейшем источником радиогенного свинца в примесном свиние исследуемых настуранов. Для решения задачи определения времени формирования первичных урановых руд использовались галениты из широко развитых на месторождении пострудных кварц-карбонатных жил. Формирование этих жил, по данным K-Ar и Rb-Sr датирования присутствующих в них мусковитов, проходило 270 ± 6 млн лет назад. В узлах пересечения с рудными зонами галениты этих жил содержат значительную добавку радиогенных изотопов ²⁰⁶Pb и ²⁰⁷Pb. Весьма рельефно зависимость степени аномальности свинца от положения галенитов по отношению к рудным зонам иллюстрируется данными по образцам, отобранным на разном расстоянии от таких пересечений (фиг. 8, табл. 6). Они достаточно определенно свидетельствуют, что источником радиогенной компоненты свинца в галенитах служили собственно урановые руды. По изотопному составу радиогенной компоненты свинца и на основании данных о возрасте пострудных жил можно установить возраст источника этой компоненты, используя соотношение:

$$({}^{207}\text{Pb}/{}^{206}\text{Pb})_{\text{R}} = \frac{({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{w}} - ({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{o}}}{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{w}} - ({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{o}}} = \frac{1}{137.88} \frac{e^{\lambda_{5f}} - e^{\lambda_{5f_m}}}{e^{\lambda_{8f_m}}},$$
(1)

где $({}^{207}\text{Pb}/{}^{206}\text{Pb})_{\text{R}}$ — изотопное отношение ${}^{207}\text{Pb}/{}^{206}\text{Pb}$ в радиогенной компоненте свинца галенитов; $({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{w}}$ и $({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{w}}$ — изотопные отношения в общем свинце галенитов; $({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{o}}$ и $({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{o}}$ — изотопные отношения в обыкновенной компоненте свинца галенитов; $({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{o}}$ и $({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{o}}$ — изотопные отно-шения в обыкновенной компоненте свинца галенитов; t — возраст первичных руд (скоплений) урана; t_m — возраст процесса экстракции радиогенного свинца из первичных скоплений урана и его переотложения в поздних жилах; λ_5 и λ_8 — постоянные распада соответственно 235 U и 238 U.

Величины $(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_{R}$, необходимые для проведения расчетов по формуле (1), наиболее точно могут быть определены из уравнений линии регрессии. Ими в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ описывается изотопный состав свинца серий проб переотложенных галенитов (фиг. 9). Линейный характер наблюдаемой связи обусловлен тем, что изотопный состав свинца одновозрастных и сингенетичных галенитов представляет двухкомпонентную смесь обыкновенного и радиогенного свинца.

На месторождении были отобраны две серии проб галенитов из кварц-карбонатных жил V-582 и V-660 на участках пересечения этими жилами рудных зон. Свинец во всех галенитах содержит заметную радиогенную добавку (табл. 6). Линии регрессии, которыми аппроксимируются изотопные данные, полученные по выбранным сериям проб (фиг. 9), проходят через точки обыкновенного свинца, что помимо уже отмеченного линейного характера связи величин изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb является важным аргументом в пользу участия двух компонентов в составе свинца переотложенных галенитов – радиогенного и обыкновенного свинца. Для уменьшения погрешностей изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb проведено нормирование результатов



Фиг. 8. Участок пересечения рудной зоны пострудной кварц-карбонатной жилой V-582. В нижней части показан характер изменения изотопного отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb в зависимости от положения места отбора галенита-4 относительно рудной зоны. 18.5 – значение отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb в обыкновенном свинце. 1 – терригенно-осадочная толща; 2 – настурановая минерализация; 3 – кварц-карбонатная жила; 4 – разрывные нарушения; 5 – участки отбора проб галенита и их номера (см. табл. 6); 6 – отношение ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, отвечающее данной пробе.

анализа каждой пробы по среднему значению ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb для проб из данной серии (данного образца). При этом предполагалось, что вариации ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb в пределах одного образца, учитывая низкое (близкое к кларковому) содержание тория на месторождении, связаны с некоторым различием фактора фракционирования в разных опытах. На графиках (см. фиг. 9) приведены как первичные данные изотопного анализа, так и те, которые получены в результате нормирования изотопных отношений. Нормирование измеренных значений отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb позволило существенно уменьшить отклонение экспериментальных точек от линии регрессии. Значения СКВО на диаграммах с нормированными значениями отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb для серий проб из образцов V-582 и V-660 соответственно в 9 и 8 раз меньше, чем на диаграммах с ненормированными отношениями ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb.

Соотношения ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb в радиогенной компоненте свинца из образцов V-582 и V-660 (см. фиг. 9) довольно близки; различия не выходят за рамки погрешностей определения. Исходя из этих соотношений и времени переотложения t_m радиогенного свинца в поздних жилах (267 ± 7 млн лет назад), по уравнению (1) рассчитан возраст скоплений урана, являвшихся источником радиогенной компоненты – 413 ± 7 млн лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На месторождении Восток — самом крупном молибден-урановом месторождении Средней Азии и Казахстана — с помощью высокоточного традиционного U—Pb (ID-TIMS) геохронологического метода, а также с привлечением данных Rb–Sr, K—Ar и Xe_n–Xe_s методов выявлены два этапа формирования богатых урановых руд.

На основании результатов U–Pb изучения локальных микрообъемов (1–15 мкг) настурана и настурана с включениями сульфидов Mo и Pb, а также Pb–Pb изучения галенита оценен возраст начального этапа уранового рудообразования (413 \pm 7 млн лет) и возраст проявленного на месторождении Восток пермского гидротермального события (267 \pm 7 млн лет), вызвавшего переотложение урана и обособление в сульфидах ранее

2022

голубев, чернышев

	Изотопные отношения								
№ пробы		Измеренные	Нормированные						
ле проов	206 Pb/ 204 Pb $\pm 2\delta$	$\frac{207}{\text{Pb}}/\frac{204}{\text{Pb}} \pm 2\delta$	208 Pb/ 204 Pb ± 2 δ	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb				
		Образец V 58	2 rop +230 opt 224						
1	108.03 ± 0.66	26.734 ± 0.080	2, 10p. + 250, 0p1 224	107.64	26 655				
1	198.05 ± 0.00 195.05 ± 0.41	26.734 ± 0.080 26.506 ± 0.084	38.439 ± 0.000	197.04	26.510				
2	193.03 ± 0.41 101.00 ± 0.17	20.300 ± 0.084 26 201 ± 0.025	38.260 ± 0.003	195.07	26.310				
3	191.90 ± 0.17	20.291 ± 0.023	38.209 ± 0.049	191.93	20.301				
4	189.00 ± 0.01	26.210 ± 0.103 26.124 ± 0.008	38.441 ± 0.183	189.22	26.132				
5	189.08 ± 0.00	20.124 ± 0.008	38.283 ± 0.017	189.09	20.123				
0	187.80 ± 0.09	26.026 ± 0.013	38.270 ± 0.021	187.90	26.035				
/	185.90 ± 0.09	25.876 ± 0.016	38.151 ± 0.041	186.23	25.945				
8	185.17 ± 0.18	25.855 ± 0.028	38.240 ± 0.034	185.29	25.879				
9	177.88 ± 0.22	25.505 ± 0.036	38.440 ± 0.038	177.53	25.429				
10	177.39 ± 0.29	25.396 ± 0.047	38.265 ± 0.040	177.44	25.407				
11	167.28 ± 0.15	24.788 ± 0.044	38.270 ± 0.108	167.32	24.797				
12	166.86 ± 0.24	24.748 ± 0.039	38.258 ± 0.064	166.92	24.762				
13	166.19 ± 0.08	24.751 ± 0.014	38.384 ± 0.017	165.98	24.704				
14	165.45 ± 0.08	24.648 ± 0.014	38.227 ± 0.037	165.58	24.677				
15	161.18 ± 0.20	24.461 ± 0.053	38.405 ± 0.094	160.93	24.405				
16	160.86 ± 0.16	24.417 ± 0.039	38.322 ± 0.105	160.79	24.401				
17	160.57 ± 0.05	24.369 ± 0.009	38.267 ± 0.015	160.61	24.379				
18	159.21 ± 0.16	24.279 ± 0.028	38.237 ± 0.047	159.32	24.303				
19	147.03 ± 0.44	23.544 ± 0.061	38.246 ± 0.102	147.11	23.563				
20	142.30 ± 0.24	23.255 ± 0.057	38.257 ± 0.081	142.36	23.269				
21	141.77 ± 0.06	23.228 ± 0.013	38.264 ± 0.024	141.81	23.239				
	1	Образец V-66	, гор. +180, орт 324		I				
22	191.13 ± 0.16	26.280 ± 0.023	38.339 ± 0.029	191.18	26.290				
23	190.18 ± 0.24	26.232 ± 0.036	38.354 ± 0.063	190.19	26.235				
24	189.11 ± 0.15	26.193 ± 0.017	38.409 ± 0.021	188.99	26.167				
25	188.54 ± 0.23	26.112 ± 0.094	38.326 ± 0.212	188.62	26.129				
26	188.22 ± 0.29	26.109 ± 0.053	38.361 ± 0.064	188.22	26.108				

 38.384 ± 0.048

 38.332 ± 0.052

 38.368 ± 0.049

Таблица 6. Результаты изотопного изучения галенитов (галенит 4) из поздних кварц-карбонатных жил V-582 и V-660

накопленного радиогенного свинца. В результате этого события первичные урановые руды месторождения Восток утратили свои U–Pb геохронометрические "метки". Однако информация о возрасте первичных руд сохранилась в виде "замороженных" изотопных отношений 206 Pb/ 204 Pb и 207 Pb/ 204 Pb в переотложенном галените. Процесс, вызвавший в пермское время переотложение урана и обособление в сульфидах радиогенного свинца в месторождении Восток, по-видимому, геологически синхронен с регио-

 187.81 ± 0.22

 186.31 ± 0.19

 185.21 ± 0.21

 26.093 ± 0.034

 25.979 ± 0.039

 25.931 ± 0.040

27

28

29

нально проявленным в Северном Казахстане термальным событием, которое привело к "омоложению" К–Аг и Rb–Sr датировок каледонских гранитоидов.

187.75

186.38

185.19

26.080 25.993

25.926

Вышеприведенная оценка времени образования первичных руд месторождения Восток вполне согласуется с нижним пределом возраста этого процесса, который вытекает из недавно полученных (Голубев и др., 2020) U–Pb и Rb–Sr датировок вулканитов и гранит-порфиров (434–424 млн лет), вмещающих руды в БРП.





Фиг. 9. Диаграммы изотопных отношений 206 Pb/ 204 Pb – 207 Pb/ 204 Pb для галенитов из образцов V-582 (a, б) и V-660 (в, г). a, в – первичные данные; б, г – результаты анализа каждой пробы нормированы по среднему значению 208 Pb/ 204 Pb для проб из данной серии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Н.С. Бортникова за обсуждение статьи и сделанные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена в рамках выполнения Государственного задания Институтом геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андерсон Е.Б., Лобиков А.Ф., Маркова Т.А., Никитин С.А. О длительности гидротермального уранового рудообразования // Изотопная геохимия процессов рудообразования. М.: Наука, 1988. С. 92–99.

Геология месторождений уран-молибденовой рудной формации. Ред. А.Б. Каждан. М.: Атомиздат, 1966. 182 с.

Гидротермальные месторождения урана. Ред. Ф.И. Вольфсон. М.: Недра, 1978. 446 с.

Голубев В.Н. Возраст рассеянной урановой минерализации в породах обрамления Стрельцовского урановорудного поля и Ямского участка (Восточное Забайкалье) // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53. № 5. С. 448–459. 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 (тезисы докладов). Санкт-Петербург, 2003. С. 132–135.

Голубев В.Н., Чернышев И.В., Агапова А.А., Боронихин В.А., Троицкий В.А. Геохронологическое изучение уранинитов по индивидуальным зернам // Масс-спектрометрия и изотопная геология. М.: Наука, 1983. С. 74–89.

Голубев В.Н., Кюне М., Поти Б. Фазовый состав и U– Рь изотопные системы настурана кварц-кальцит-настурановых жил месторождения Шлема-Альберода // Геология руд. месторождений. 2000. № 6. С. 513–525.

Голубев В.Н., Макарьев Л.Б., Былинская Л.В. Отложение и ремобилизация урана в Северо-Байкальском регионе по данным анализа U–Pb и Pb–Pb изотопных систем урановых руд // Геология руд. месторождений. 2008. № 6. С. 548–557.

Голубев В.Н., Шатагин К.Н., Сальникова Е.Б., Чернышев И.В. Северо-Казахстанская урановорудная провинция, Кокчетавский массив: U–Pb (ID-TIMS) и Rb–Sr геохронология пород рудовмещающих вулкано-тектонических депрессий // Геология руд. месторождений. 2020. № 1. С. 4–22.

Голубев В.С. Динамика геохимических процессов. М.: Недра, 1981.

Дара А.Д., Сидоренко Г.А., Скворцова К.В., Валуева А.А. Новые данные о фемолите // Рентгенография минерального сырья. 1977. Сб. 11. С. 28–33.

Дымков Ю.М. Природа урановой смоляной руды. М.: Атомиздат, 1973. 240 с.

Дымков Ю.М. Парагенезис минералов ураноносных жил. М.: Недра, 1985. 207 с.

Дымков Ю.М., Волков Н.И., Шилякова И.И., Назаренко Н.Г., Павлов Е.Г. Настуран из уран-молибденового месторождения // Атомная энергия. 1974. Т. 36. С. 506-512.

Дымкова Г.А., Прибытков П.В., Назаренко Н.Г. и др. Исследование гетерогенности настуранов и продуктов их термической переработки // Новые данные о минералах. 1983. Вып. 31. С. 51–65.

Кигай И.Н. Модель многостадийного минералообразования, согласующаяся с вариациями основных параметров гидротермального процесса // Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования. Новосибирск: Наука, 1979. Т. II. С. 3–34.

Мельников И.В., Горшков А.И., Стрельцов В.А., Иванова О.А., Коровушкин В.В., Боронихин В.А., Соболева С.В. О некоторых кристаллических особенностях структуры тонкодисперсных железосодержащих дисульфидов молибдена // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1978. № 1. С. 123–135.

Рундквист Д.В., Денисенко В.К., Павлова И.Г. Грейзеновые месторождения (онтогенез и филогенез). М.: Недра, 1971.

Рябева Е.Г. О микронеоднородности настурана // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 1982. № 1. С. 42–46.

Скворцова К.В., Сидоренко Г.А., Дара А.Д., Силантьева Н.И., Медоева М.М. Фемолит – новый сульфид молибдена // Зап. ВМО. 1964. Вып. 4. Ч. 93. С. 439–444.

Текстуры и структуры урановых руд эндогенных месторождений. М.: Атомиздат, 1977. С. 111–128.

Урановые и молибден-урановые месторождения в областях развития континентального внутрикорового магматизма: геология, геодинамические и физико-химические условия формирования. М.: ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН, 2012. С. 19–57.

Чернышев И.В. Уран-свинцовая геохронология процессов формирования и преобразования гидротермальных урановых месторождений // Гидротермальные месторождения урана. М.: Недра, 1978. С. 376–398.

Чернышев И.В., Голубев В.Н. Изотопная геохронология процессов формирования месторождения Стрельцовское, Восточное Забайкалье – крупнейшего уранового месторождения России // Геохимия. 1996. № 10. С. 924–937.

Чернышев И.В., Голубев В.Н., Троицкий В.А., Агапова А.А., Цветкова М.В., Щербинина Н.К. Изохронные построения и локализация отбора проб // Масс-спектрометрия и изотопная геология. М.: Наука, 1983. С. 90–108.

Чернышев И.В., Голубев В.Н., Чугаев А.В. Аномальный изотопный состав свинца галенита и возраст процесса

преобразования гидротермальных урановых минералов (на примере месторождения Чаули, Чаткало-Кураминский район, Узбекистан // Геология руд. месторождений. 2017. № 6. С. 576–586.

Чернышев И.В., Голубев В.Н., Чугаев А.В., Манджиева Г.В., Гареев Б.И. Поведение изотопов ²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁴U в процессе окислительного выветривания минерализованных урансодержащих пород (на примере изучения пород, урановых минералов и вод карьера месторождения Тулукуевское, Восточное Забайкалье) // Петрология. 2019. Т. 27. № 4. С. 446–467.

Eckelmann W.R., Kulp J.L. Uranium lead method of the age determination. Part 1. Lake Athabasca // Bull. Geol soc. Amer. 1957. V. 68. № 9. P. 35–53.

Golubev V.N., Chernyshev I.V. Radiogenic lead in sulfide minerals from uranium deposits and its geochronological significance // International conference "Uranium Geochemistry" 2003, Nancy-France, 2003. P. 169–172.

Golubev V.N., Kister P., Cuney M. Multiple episodes of uranium deposition and/or remobilization in the Shea Creek unconformity related deposit, Western Athabasca Basin (Saskatchewan, Canada) // JAGOD-2006. CD 179.

Henry C.D., Elson H.B., McIntosh W.C., Heizler M.T., Castor S.B. Brief Duration of Hydrothermal Activity at Round Mountain, Nevada, Determined from ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology // Econ. Geol. 1997. V. 92. P. 807–826.

Hills J.H., Richards J.R. Pitchblende and galena ages in the Alligator River Region, Nothern Territory, Australia // Mineral. Deposita (Berl.). 1976. V. 3. № 11. P. 133–154.

Kister P., Cuney M., Golubev V.N., Royer J.J., Le Carlier De Vesuld Ch., Rippert J.C. Radiogenic lead mobility in the Shea Creek unconformity-related uranium deposit (Saskatchewan, Canada): migration pathways and Pb loss quantification // Comptes Rendus Géosciences. 2004. V. 336. 3. P. 205–215.

Leavitt E.D., Spell T.L., Goldstrand P.M., Arehart G.B. Geochronology of the Midas Low-Sulfidation Epithermal Gold-Silver Deposit, Elko County, Nevada E. D. // Econ. Geol. 2004. V. 99. P. 1665–1686.

Ludwig K.R. PbDat for MS-DOS, version 1.21 // U.S. Geol. Survey Open-File Rept. 88–542. 1991b. 35 p.

Ludwig K.R. Isoplot 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center Spec., 2003. V. 4.

Shukolukov Yu.A., Meshic A.P. Application of xenon isotopes for dating pitchblendes // Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sec.). 1987. V. 66. P. 123–136.

Steiger R.H., Jager E. Subcomission of Geochronology: convension of the use of decay constants in geo- and cosmochronology // Earth Planet. Sci. Lett. 1976. V. 36. No 2. P. 359-362.

Uranium Deposits in Volcanic Rocks // Proceeding of a technical committee meeting El Paso, Texas, 2–5 April 1984, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1985, 468 p.