

УДК 552.11

ИЛЕЙСКОЕ ФЛЮОРИТ-ФЕНАКИТОВОЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЕ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН): ВКЛАД ДЕВОНСКОГО РИФТОГЕННОГО МАГМАТИЗМА В ФОРМИРОВАНИЕ ВОСТОЧНО-САЯНСКОЙ РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

© 2024 г. Д. А. Лыхин^{1,*}, А. А. Воронцов², академик РАН В. В. Ярмолюк¹

Поступило 27.09.2023 г.

После доработки 01.10.2023 г.

Принято к публикации 03.10.2023 г.

В пределах Алтае-Саянской складчатой области, охватывающей территорию Восточно-Тувинского нагорья и Восточного Саяна, сосредоточена одна из богатейших редкометалльных провинций России. Месторождения редких металлов, элементов и земель, сформировавшихся в ее пределах, имеют разный возраст и возникли в разных геотектонических обстановках и в разные металлогенические эпохи. Они связаны с внедрением массивов щелочных пород, которые распространены вдоль системы разломов между каледонидами Алтае-Саянской складчатой области и Тувино-Монгольским докембрийским супертеррейном. Ареал их распространения определяется также как Восточно-Саянская редкометалльная металлогеническая зона (ВСМЗ), возникающая в связи с воздействием мантийных плюмов на юго-западное обрамление Сибирской платформы. Проведены геохимические и геохронологические исследования на Илейском флюорит-фенакитовом рудопроявлении. Рудопроявление возникло в результате внедрения гранитоидов огнитского комплекса в известняки монгошинской свиты, которые стали геохимическим барьером для магматического флюида, обогащенного фтором и Ве. Геохронологические Rb–Sr- и Ag–Ag-исследования показали, что субщелочные граниты, а также кислые вулканиды илейской толщи имеют среднедевонский возраст ~390 млн лет, что согласуется с оценками возраста для пород огнитского комплекса. Таким образом, одновозрастность магматизма и рудообразования на Илейском рудопроявлении свидетельствует о вкладе девонского магматизма в формирование редкометалльной минерализации в пределах ВСМЗ.

Ключевые слова: флюорит-фенакитовое рудопроявление, девонский магматизм, редкие металлы, возраст, геохронология

DOI: 10.31857/S2686739724020087

В восточной части Алтае-Саянской складчатой области (АСО), охватывающей территорию Восточной Тувы и Восточного Саяна, располагается одна из крупнейших редкометалльных (Nb, Ta, Be, Li, Zr, Th, REE) провинций России [1, 2]. Сформировавшиеся в ее пределах месторождения имеют разный возраст и возникли в разных геодинамических условиях в разные металлогенические эпохи. Общим для них является связь с массивами щелочных пород, распределенных вдоль системы разломов, которая

определяет границу между каледонидами АСО и Тувино-Монгольским докембрийским супертеррейном. Пояс их распространения определяется так же, как Восточно-Саянская редкометалльная металлогеническая зона (ВСМЗ). Щелочной магматизм в ее пределах связывается с воздействием мантийных плюмов на юго-западное обрамление Сибирской платформы [3]. Выделяются раннепалеозойская (ордовик), среднепалеозойская (ранний девон) и позднепалеозойская (поздний карбон – ранняя пермь) эпохи подобной активности. Эти эпохи стали временем крупных структурных перестроек континентальной коры в регионе, сопровождавшихся интенсивным магматизмом внутриплитного типа, в том числе редкометалльного щелочного (рис. 1).

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

²Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: lykhind@rambler.ru

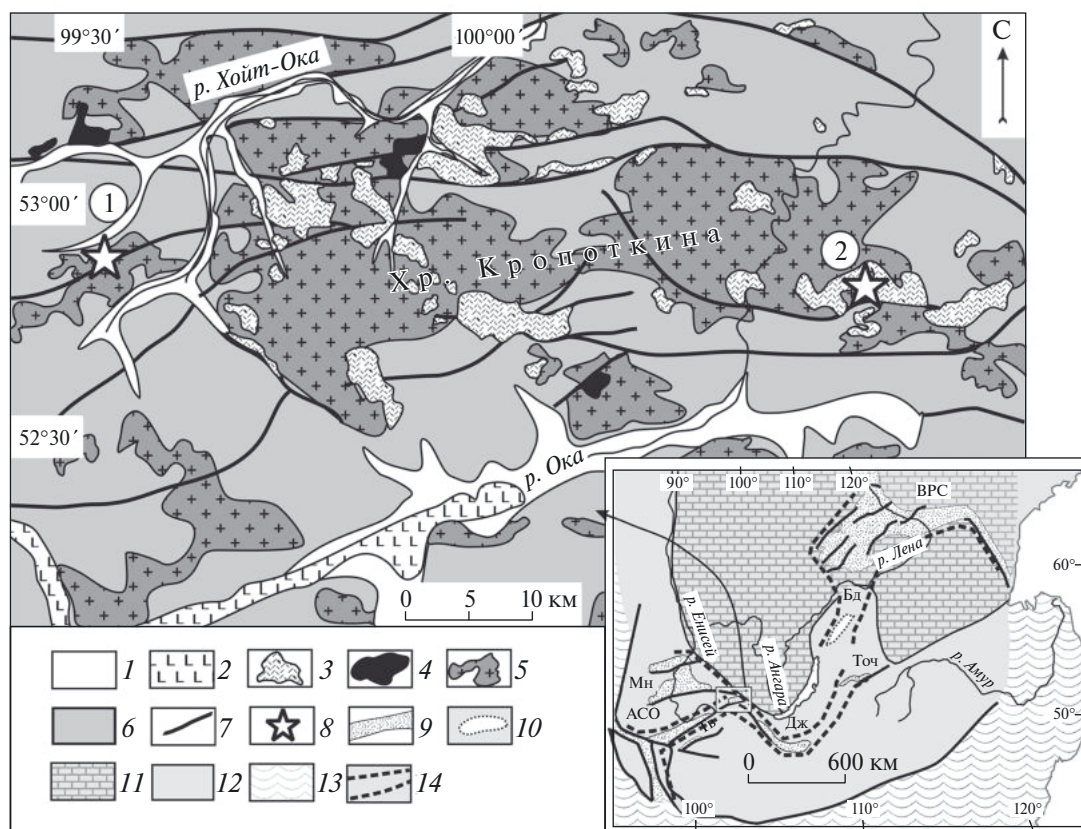


Рис. 1. Схема распространения раннедевонских вулканоплутонических ассоциаций в районе хр. Кропоткина по [7]. 1 – рыхлые отложения; 2 – четвертичные базальты; 3–5 – раннедевонские магматические ассоциации: 3 – трахириолит-комендитовые, 4 – базальтовые и бимодальные базальт-трахириолит-комендитовые, 5 – субщелочные и щелочные граниты и сиениты; 6 – додевонские гнейсограниты, габброиды, гранодиориты и плагиограниты; 7 – разломы; 8 – положение Снежного месторождения (1) и Илейского рудопроявления (2); 9–14 – условные к врезке: 9 – вулканические впадины и грабены, 10 – область распространения базитовых интрузий в основании Бодайбинского прогиба, 11 – Сибирская платформа, 12 – территория палеоконтинента, 13 – Палеоазиатский океан, 14 – предполагаемые контуры девонской рифтовой системы. ВРС – Вилуйская рифтовая система, АСО – Алтае-Саянская рифтовая область. Грабены и впадины: Мн – Минусинская, Тв – Тувинский, Дж – Джида-Хасуритинский, Точ – Точерский, Бд – Бодайбинский. Прямоугольным контуром выделена территория хр. Кропоткина.

Наиболее продуктивными в отношении формирования редкометальной минерализации в пределах ВСМЗ стали раннепалеозойская и позднепалеозойская эпохи [4]. В раннем палеозое здесь сформировались редкометальные месторождения Арыскан, Окуневка и некоторые другие [5]. В позднем палеозое возникли такие крупные редкометальные месторождения, как Зашихинское, Снежное, Улуг-Танзек, Улан-Тологойское и ряд более мелких проявлений [4, 6].

В отличие от них среднепалеозойская эпоха в металлогеническом отношении остается слабо выраженной, несмотря на то, что наиболее значимыми в строении АСО стали внутриплитные процессы раннего девона, в результате которых возникла крупнейшая Алтае-Саянская рифтовая система [7]. Одна из ветвей этой системы

прослеживается вдоль Тувинского прогиба в сторону Восточного Саяна. В пределах последнего к продуктам рифтогенного магматизма отнесены многочисленные массивы субщелочных и щелочных габброидов, долеритов, сиенитов и гранитоидов, объединяемые в огнитский комплекс, а также поля щелочных вулканитов. Наиболее широко эти породы представлены в хребте Кропоткина [7], который расположен на пересечении ВСМЗ с хребтами Восточного Саяна. Несмотря на то, что эти породы характеризуются повышенными содержаниями Nb, Zr, REE и др., в связи с ними достоверных проявлений редкометальной минерализации установлено не было. Этот факт, в частности, стал одним из аргументов, поставивших под сомнение широкое развитие девонского магматизма в Восточном Саяне [8]. В настоящей статье приведены

данные об Илейском флюорит-фенакитовом рудопроявлении, его строении и возрасте, которые показывают, что девонская эпоха внутриплитной активности также оставила свой след в формировании ВСМЗ.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Илейское флюорит-фенакитовое рудопроявление находится в западной части республики Бурятии вблизи ее границы с Иркутской областью (рис. 2). Рудопроявление расположено в хребте Кропоткина (Восточный Саян) на высоте 2050–2250 м над уровнем моря на левом борту ручья Илеэ (бассейн р. Оки). Рудопроявление относится к берtrandит-фенакит-флюоритовой формации [9, 10].

Илейское рудопроявление расположено в зоне сопряжения крупных долгоживущих глубинных разломов — Главного Саянского и Жом-Болокского. Вмещающими породами для него служат тонко-мелкокристаллические неопротерозойские известняки монгошинской свиты, образующие блок 400–200 метров. Известняки прорваны сиенит-порфирами, биотитовыми гранитами, субщелочными и щелочными лейкогранитами, относимыми к огнитскому комплексу, кроме того, они перекрыты породами девонской илейской толщи, представленными фельзитами, фельзитовыми и дацитовыми порфирами, андезитовыми порфирами, пантеллеритами, комендитами, их игнимбритами и туфами.

Рудопроявление в структурном отношении располагается в узле пересечения различных нарушений северо-восточного (50° – 60°) и субширотного (70° – 85°) направлений с крутыми углами падения (60° – 80°) соответственно на юго-восток и северо-запад. Рудная минерализация развивается в известняках в зонах катаклаза и милонитизации, а также непосредственно в экзоконтактах щелочных гранитов. Ее формирование связывается с внедрением гранитоидов огнитского комплекса в известняки монгошинской свиты, которые стали геохимическим барьером для обогащенного фтором и бериллием магматического флюида.

Рудные тела представлены жилами и линзами с раздувами и пережимами. На рудопроявлении выделяется три рудных участка: центральный, западный и северный. На центральном участке мощность рудных жил колеблется от 0.5–0.8 м до 1–1.5 м, единичные до 5–10 м, длина рудных жил 80–120 м, жилы залегают под углом 45° – 60° . На западном участке рудные тела залегают в экзоконтакте интрузии гранитоидов в известняках

и имеют небольшую мощность 15–20 см, протяженность 10–30 м. Простираение жил точно повторяет контакты гранитоидов с известняками. Падение жил крутое, в сторону известняков. Контакты рудных жил с известняками резкие. Северный участок расположен вдоль контакта известняков с лавобрекчиями, крупнообломочными туфами и фельзитами илейской свиты и представлен зоной флюоритизации в известняках мощностью от 0.3–5 м до 14 м, протяженностью около 500 м.

Рудные жилы состоят из флюорита, калиевого полевого шпата, кварца, кальцита, биотита и серицита, также встречаются апатит, сфен, пирит, сфалерит, гематит и актинолит, бериллиевые минералы, по данным И.И. Куприяновой, представлены в основном фенакитом, отмечаются единичные находки берtrandита и мелинофана. В зависимости от состава и текстурно-структурных особенностей выделяются массивные и прожилково-вкрапленные типы руд (рис. 3).

Массивные руды представляют собой тонко-мелкозернистые образования фиолетового и сиреневого цветов, характеризуются сетчатым, ячеистым строением, обусловленным выделением флюорита, слагающего основную (90%) массу породы с переменным небольшим содержанием кварца, калиевого полевого шпата, кальцита, серицита, встречаются также апатит, сфен, пирит, сфалерит, гематит и фенакит. Такие руды в основном сконцентрированы в центральном участке рудопроявления, в меньшей степени они развиты в западном участке.

Прожилково-вкрапленные руды с бедными бериллиевыми рудами развиты преимущественно на северном и западном участках. Они представлены мелкозернистыми породами пятнистого облика, окрашенными в зеленовато-фиолетовый цвет. В составе их присутствуют флюорит, кварц, кальцит, серицит, актинолит, пироксен, гранат, везувиан и редкий фенакит.

МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Интрузивные породы на месторождения представлены тремя разновидностями: 1 — средне-крупнозернистыми субщелочными и щелочными лейкогранитами, 2 — порфировидными кварцевыми и щелочными сиенитами, 3 — мелкозернистыми биотитовыми гранитами. Кроме того, в пределах месторождения присутствуют отдельные дайки маломощных от 10 до 50 см фельзит-порфиров и гранит-порфиров.

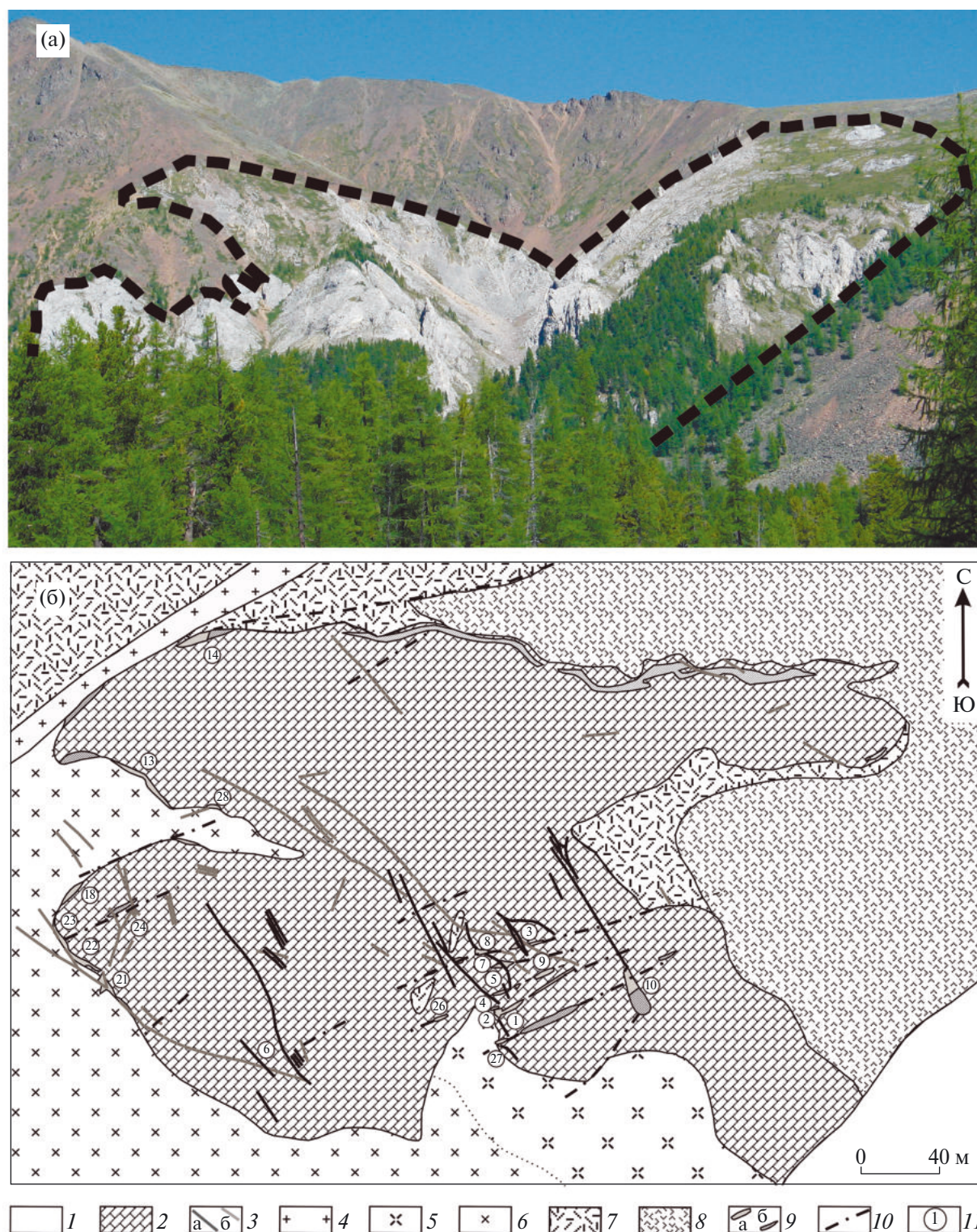


Рис. 2. Строение Илейского рудопоявления. а – фотография, пунктиром выделены выходы известняков монгошинской свиты; б – геологический план Илейского рудопоявления. 1 – ледниковые отложения; 2 – известняки верхнепротерозойской Монгошинской свиты; 3–8 – девонский вулканоплутонический комплекс: 3–6 – Огнитский комплекс: 3 – дайки: а – гранит-порфиры, кварцевые порфиры, б – измененные порфиры, 4 – мелкозернистые лейкократовые граниты, 5 – средне- и крупнозернистые порфировидные лейкократовые граносиениты и кварцевые сиениты, 6 – лейкократовые сиенит-порфиры; 7–8 – Илейская толща: 7 – фельзиты, 8 – лавобрекчии; 9 – флюоритовые жилы: а – закартированные, б – предполагаемые; 10 – разломы; 11 – номера рудных тел.

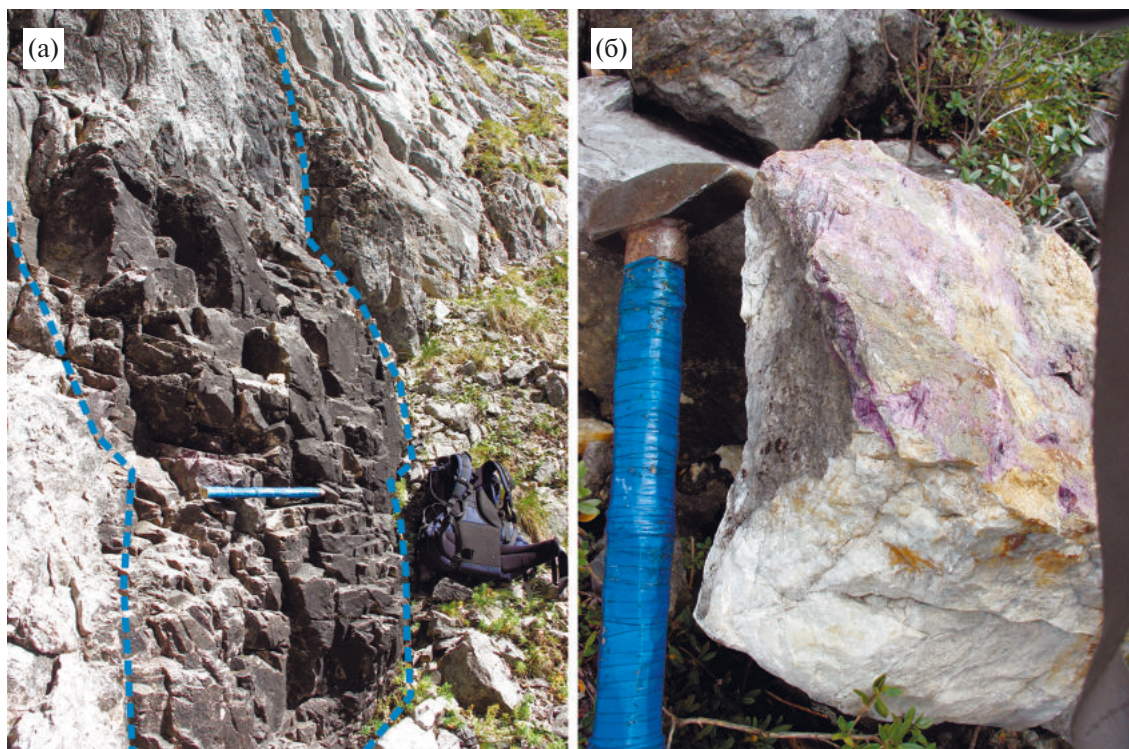


Рис. 3. а — жила массивных руд с резкими контактами из центрального участка рудопрооявления; б — прожилково-вкрапленные руды из западного участка.

Вулканиды илейской свиты, перекрывающие известняки монгошинской свиты, отвечают кремнекислым породам, среди которых преобладают фельзитовые порфириды, дациты, андезитовые порфириды, пантеллериты, комендиты.

В петрохимическом отношении магматические породы Илейского рудопрооявления относятся к субщелочному ряду. Содержание щелочей в лейкогранитах колеблется от 8.28 до 9.17%, в фельзитных порфирах от 8.48 до 9.76%,

в пантеллеритах от 10.41 до 11.42%, в дайке щелочных гранитов 11.09%, а в андезитах 7.32%.

Изученные гранитоиды имеют близкие геохимические характеристики. Относительно примитивной мантии они характеризуются глубокими минимумами концентраций Sr, Eu, Ti и повышенными содержаниями Rb, Pb, с преобладанием легких редких земель над тяжелыми $(La/Yb)_n = 3.8-14.4$ (табл. 1, рис. 4). Вулканиды илейской толщи по распределению РЗЭ схожи

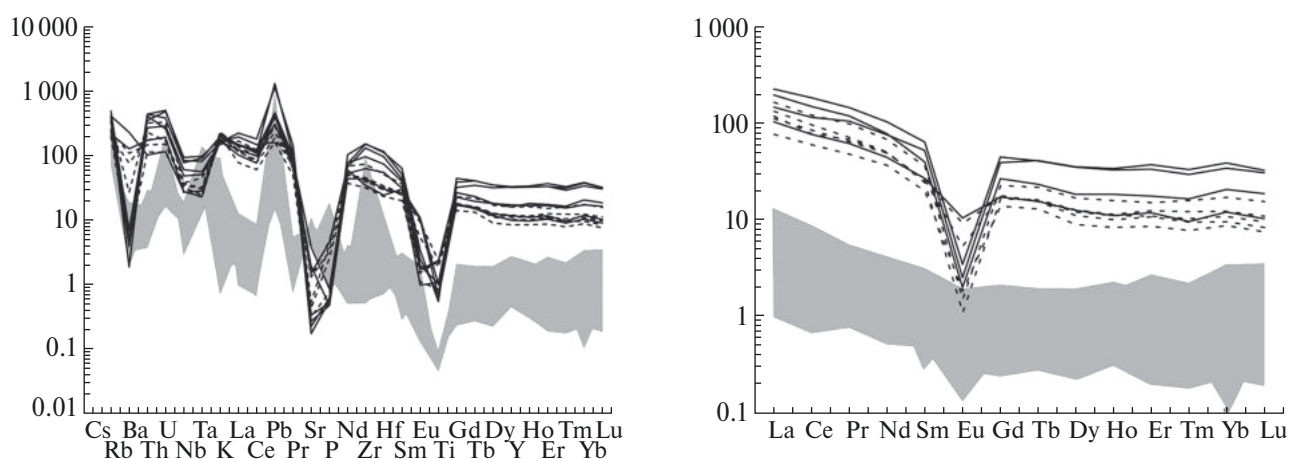


Рис. 4. Графики нормированного распределения редких и редкометалльных элементов в магматических породах и рудах Илейского рудопрооявления по [11]. Гранитоиды — сплошные линии; вулканиды илейской толщи — пунктирные линии; руды — выделены серым полем.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и содержания элементов-примесей (г/т) в породах Илейского рудопрооявления

Компоненты	Ил-1/08	Ил-3/08	Ил-19/08	Ил-2/08	Ил-9/08	Ил-18/08	Ил-4/08
	Массив субщелочных гранитов		Дайки умеренно щелочных лейкогранитов				Дайка щелочного гранита
SiO ₂	75.6	75.3	74.0	73.8	76.4	74.1	67.3
TiO ₂	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.5
Al ₂ O ₃	11.6	10.6	13.2	12.1	11.4	12.4	15.1
FeO _{общ}	3.3	4.5	2.3	2.1	2.9	2.8	3.9
MnO	0.1	0.1	0.05	0.04	0.02	0.1	0.1
MgO	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
CaO	0.1	0.2	0.3	1.5	0.1	0.5	1
Na ₂ O	4.2	4	4.1	4.3	3.5	3.2	5.6
K ₂ O	4.5	4.6	5.0	4.4	4.7	5.9	5.5
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.1
CO ₂	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
П.п.п.	0.23	0.29	0.65	1.46	0.51	0.55	0.71
Сумма	99.96	99.84	100.01	99.93	99.84	99.93	100.02
Be	3.21	1.66	2.99	4.33	1.81	1.64	4.61
V	9.57	9.16	11.04	11.7	15.15	14.82	9.83
Co	0.54	0.67	0.6	0.73	1.41	0.88	0.65
Zn	75.01	120.4	161.2	162.1	90.82	82.27	160.2
Ga	27.69	28.48	30.84	30.05	23.75	24.76	29.27
Rb	166.7	232.4	318.6	256.3	140.6	269.9	216.6
Sr	3.85	5.92	5	7.45	41.78	83.44	33.4
Y	75.25	81.23	155.9	151.2	54.97	46.88	152.4
Zr	1111	728	1746	1767	509	403	1534
Nb	36	44.74	69.15	61.67	19.96	20.41	57.66
Ba	30.07	28.47	50.08	13.61	928.5	1669	35.79
La	142.7	90.63	106.4	164.3	75.11	109.2	108.2
Ce	283.3	187	218.3	347.1	145.6	208.3	231.8
Pr	33.27	22.25	29.34	40.46	17.2	23.83	27.87
Nd	109.5	74.88	107	145.9	62.34	84.8	94.94
Sm	18.28	14.43	23.9	29.3	12.34	13.88	20.04
Eu	0.34	0.17	0.43	0.59	1.78	1.89	0.3
Gd	16.24	13.9	23.69	27.25	10.47	10.79	19.58
Tb	2.28	1.92	4	3.98	1.52	1.48	3.41
Dy	13.84	13.73	26.77	26.66	9.46	8.98	24.14
Ho	3.05	2.82	5.65	5.46	1.84	1.64	5.43
Er	8.70	8.33	18.28	16.53	5.82	5.15	16.53
Tm	1.31	1.24	2.64	2.34	0.77	0.72	2.53
Yb	10.27	8.62	19.25	17.03	5.97	5.18	18.67
Lu	1.48	1.32	2.59	2.44	0.82	0.72	2.57
Hf	23.83	17.67	37.16	35.65	9.64	7.8	30.8
Ta	2.13	2.36	4.1	3.44	1.19	0.98	3.87
Pb	11.3	21.36	91.98	80.05	30.17	28.62	32.46
Th	37.82	25.01	32.4	40.53	15.89	9.44	40.65
U	5.7	6.37	10.66	11.03	4.25	2.56	8.39

Продолжение табл. 1. Химический состав (мас. %) и содержания элементов-примесей (г/т) в породах Илейского рудопроявления

Компоненты	ИЛ-1/2	ИЛ-1/3	ИЛ-1/4	ИЛ-2/2	ИЛ-2/3	ИЛ-20/08	ИЛ-1/1	ИЛ-2/4
	Пантеллериты					Фельзитовые порфиры		
SiO ₂	66.99	66.82	69.15	66.09	63.86	74.4	74.39	73.38
TiO ₂	0.516	0.555	0.402	0.46	0.574	0.5	0.227	0.184
Al ₂ O ₃	14.79	15.2	13.83	14.93	15.81	12.5	12.36	12.79
FeO _{общ}	4.31	4.22	3.89	5.06	5.92	3.6	3.04	3.12
MnO	0.15	0.09	0.13	0.26	0.17	0.1	0.06	0.01
MgO	0.26	0.34	0.27	0.23	0.25	0.1	0.11	0.11
CaO	0.93	0.74	0.89	0.98	0.82	0.2	0.21	0.27
Na ₂ O	4.95	5.14	4.51	5.47	5.32	4.3	4.4	3.34
K ₂ O	6.47	6.08	6	5.56	5.09	4.2	4.46	6.42
P ₂ O ₅	0.1	0.11	0.07	0.05	0.24	0.1	0.02	0.02
CO ₂	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
П.п.п.	0.51	0.6	0.82	0.5	1.85	0.33	0.7	0.37
Сумма	99.98	99.88	99.96	99.6	99.91	100.28	99.98	100.02
Be	3.96	н/о	5.01	3.18	н/о	2.45	н/о	2.74
V	6.56	н/о	4.32	2.86	н/о	11.92	н/о	3.13
Co	1.37	н/о	1.02	1.24	н/о	0.71	н/о	0.97
Zn	84.6	н/о	98.8	86.1	н/о	86.35	н/о	47.4
Ga	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	25.55	н/о	н/о
Rb	154	н/о	128	129	н/о	214.3	н/о	229
Sr	29.6	н/о	29	9.58	н/о	11.87	н/о	7.06
Y	48.2	н/о	52.2	39.8	н/о	75.48	н/о	56.2
Zr	477	н/о	531	370	н/о	863	н/о	459
Nb	23.5	н/о	25.5	21.1	н/о	28.07	н/о	27.4
Ba	792	н/о	560	33.8	н/о	195.5	н/о	53.9
La	88.4	н/о	83.1	57.2	н/о	123.5	н/о	99.2
Ce	150	н/о	164	116	н/о	235.1	н/о	187
Pr	19.4	н/о	18.5	13.7	н/о	28.1	н/о	20.4
Nd	70.7	н/о	70.4	52.6	н/о	97.56	н/о	72.6
Sm	12	н/о	12.1	9.28	н/о	16.74	н/о	11.3
Eu	1.6	н/о	0.93	0.32	н/о	0.26	н/о	0.19
Gd	10.8	н/о	11.1	8.59	н/о	14.13	н/о	10.3
Tb	1.54	н/о	1.57	1.3	н/о	2.16	н/о	1.61
Dy	8.55	н/о	9.35	6.92	н/о	13.04	н/о	9.77
Ho	1.7	н/о	1.88	1.42	н/о	2.71	н/о	1.93
Er	5.41	н/о	5.5	4.31	н/о	7.58	н/о	6.25
Tm	0.77	н/о	0.84	0.63	н/о	1.29	н/о	0.99
Yb	4.84	н/о	5.52	4.42	н/о	8.73	н/о	6.21
Lu	0.68	н/о	0.78	0.61	н/о	1.26	н/о	0.89
Hf	9.36	н/о	10.8	7.47	н/о	16.26	н/о	10.4
Ta	1.04	н/о	1.28	0.96	н/о	1.9	н/о	1.33
Pb	13.2	н/о	20.4	11.4	н/о	26.86	н/о	16.2
Th	13.6	н/о	16.3	10.5	н/о	29.81	н/о	21.1
U	3.32	н/о	4.12	2.48	н/о	7.31	н/о	3.75

Окончание табл. 1. Химический состав (мас. %) и содержания элементов-примесей (г/т) в породах Илейского рудопроявления

Компоненты	Ил-21/08	И-7	И-14	И-17	И-25	Ил-5/08	Ил-7/08	Ил-11/08	Ил-14/08	Ил-27/08	Ил-29/08
	Известняк	Флюорит-карбонат-Be руды									
SiO ₂	1.8	9.8	11.4	9.0	9.9	11.7	12.1	12.3	14.1	12.8	2.9
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	0.2	2.9	3.1	2.5	2.7	3.9	2.6	3.4	3.1	5.3	1.2
FeO _{общ}	0.1	0.8	0.5	0.7	1.0	0.2	0.5	0.2	0.1	0.4	0.5
MnO	0.01	0.03	0.03	0.08	0.08	0.03	0	0	0.03	0.4	0.1
MgO	3.2	0.2	0.2	61.2	0.7	59.1	59.1	59.0	57.2	50.2	61.1
CaO	52.4	63.1	61.2	0.4	60.5	0.2	0.3	0.1	0.1	0.3	1.0
Na ₂ O	0.2	0.1	0.1	2.0	0.1	2.2	2.2	2.6	2.9	0.6	0.6
K ₂ O	0.1	2.4	2.6	0.1	2.0	0.1	0.0	0.1	0.1	1.7	0.0
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0	0.02	0.1	0.02	0.02	0.4
CO ₂	н/о	0.24	0.23	2.56	2.91	0.9	1.66	1.12	1.07	18.56	17.34
П.п.п.	42.31	н/о	н/о	2.66	н/о	1.48	2.13	1.37	1.31	18.56	17.36
Сумма	100.44	79.47	79.24	81.27	80.01	79.71	80.65	80.14	80.08	108.81	####
Be	1.17	2.69	1350	2.02	1.89	1.42	4.36	1.85	7.15	2.03	1.42
V	9.01	10.22	9.97	11.7	12.3	10.23	11.81	10.94	11.37	13.93	11.37
Co	0.8	1.09	0.97	0.91	1.02	1.10	1.17	0.97	0.94	1.59	0.86
Zn	5.43	16.71	25.9	39.5	39.7	9.52	20	10.74	11.14	29.25	6.37
Ga	0.52	3.07	2.78	3.33	3.51	3.88	3.8	4.25	4.38	6.49	1.63
Rb	7	136.1	138	132	147	114.5	133.8	157.6	162.1	46.49	65.76
Sr	429.4	222.3	196	222	223	237.4	182.7	209.5	223.4	174.6	95.65
Y	0.9	7.85	2.12	10.1	10.3	4.06	2.74	4.18	3.94	12.89	11.36
Zr	13.23	17.67	6.08	6.57	7.25	71.85	16.08	31.85	8.2	38.73	1057
Nb	0.45	5.35	5.05	6	13.9	6.87	5.94	5.29	6.16	2.18	7.88
Ba	5.49	42.08	55.1	33.6	37	30.53	33.73	50.88	23.21	136.1	14.52
La	0.85	1.96	0.71	2.14	2.27	1.51	1.79	2.73	1.56	9.23	2.76
Ce	1.16	3.91	1.27	3.94	4.01	2.27	3.5	5.03	2.62	16.46	4.77
Pr	0.17	0.45	0.21	0.61	0.61	0.27	0.4	0.66	0.4	1.53	0.66
Nd	0.7	1.81	0.72	2.28	2.12	1.13	1.56	2.46	1.53	5.79	2.83
Sm	0.09	0.46	0.22	0.65	0.61	0.22	0.4	0.13	0.39	1.43	0.69
Eu	0.01	0.1	0.05	0.05	0.06	0.02	0.09	0.15	0.05	0.33	0.14
Gd	0.1	0.47	0.14	0.73	0.81	0.26	0.32	0.51	0.27	1.28	0.85
Tb	0.02	0.11	0.03	0.16	0.13	0.07	0.04	0.09	0.06	0.19	0.18
Dy	0.07	0.61	0.17	1.03	1.04	0.33	0.38	0.43	0.48	1.45	1.28
Ho	0.03	0.14	0.05	0.2	0.17	0.08	0.08	0.11	0.11	0.38	0.31
Er	0.05	0.41	0.09	0.40	0.54	0.15	0.11	0.33	0.21	0.88	1.33
Tm	0.01	0.05	0.01	0.07	0.08	0.02	0.03	0.05	0.04	0.14	0.18
Yb	0	0.37	0.11	0.41	0.42	0.14	0.19	0.05	0.22	0.82	1.7
Lu	0.01	0.07	0.02	0.05	0.05	0.02	0.02	0.04	0.03	0.13	0.28
Hf	0.27	0.47	0.39	0.23	0.26	2.36	0.54	0.94	0.39	0.65	3.84
Ta	0.09	2.2	3.98	2.08	5.77	1.84	1.85	1.64	1.36	0.51	1.27
Pb	1.51	11.82	12.9	15.1	10.9	1.64	2.04	2.35	1.92	60.35	1.04
Th	0.17	2.7	0.34	0.74	0.81	0.58	0.64	0.94	0.36	1.54	0.94
U	0.42	0.57	0.52	1.24	1.16	0.36	0.89	1.98	1.42	4.54	3.70

Примечание: П.п.п. – потери при прокаливании, н/о – не определялось, FeOобщ – железо общее.

с лейкогранитами и обладают минимумом содержаний Sr, Eu, Ti, максимумами Rb, Pb и преобладанием легких редких земель над тяжелыми $(La/Yb)_n = 8.9-12.5$. На дискриминационных петрохимических диаграммах Nb–Y и Rb–Y+Nb [12] все огнитские щелочные граниты и вулканыты с Илея попадают в поле внутриплитных образований (WRG). Руды Илейского рудопроявления имеют ровный спектр распределения РЗЭ, близкий с субщелочными гранитами $(La/Yb)_n = 1.11-7.74$, на мультиэлементной диаграмме они характеризуются минимумами содержаний Rb, Nb, Eu, Ti и максимумами U, Pb, Ta, Zr. Содержания Be в целом низкие, но в отдельных пробах доходит до 1350 г/т.

Для определения возраста (Rb–Sr- и Ar–Ar-) и изотопных (Sm–Nd-) характеристик магматических пород, участвующих в строении Илейского рудопроявления, были изучены субщелочные средне-крупнозернистые лейкограниты огнитского комплекса и вулканыты (фельзит-порфиры и пантеллериты) илейской свиты. Состав лейкогранитов определяют калишпат-пертит (70–75%) и кварц (25–30%), в породах также отмечается арфведсонит 5% и в качестве аксессуарных — ильменит, бастнезит, монацит, циркон, флюорит и гадолинит. Фельзиты — фиолетовые порфировые породы с вкрапленниками кварца 20–30% в существенно полевошпатовой основной массе. Пантеллериты — мелкозернистые породы с микрогранитной основной массой и редкими фенокристаллами калиевого полевого шпата, кварца и арфведсонита, основная масса сложена теми же минералами и альбитом в соотношении: КПШ 30–40%, альбит 30–40%, кварц 10–15%, арфведсонит ~5%.

ВОЗРАСТ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ИХ ИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ

Изучение Rb–Sr- и Sm–Nd-изотопных систем в породах месторождения проводилось в изотопной лаборатории ИГГД РАН,

Rb–Sr- по методике, описанной в работе [13], а Sm–Nd- по [14]. Изотопный анализ выполнен на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре “Finnigan” MAT-261 и TRITON. Воспроизводимость определения концентраций Rb, Sr, Sm и Nd, вычисленная на основании многократных анализов стандарта BCR-1, соответствует $\pm 0.5\%$. Величина холостого опыта составляла: 0.05 нг для Rb, 0.2 нг для Sr, 0.3 нг для Sm и 0.8 нг для Nd. Результаты анализа стандартного образца BCR-1 (6 измерений): $[Sr] = 336.7$ мкг/г, $[Rb] = 47.46$ мкг/г, $[Sm] = 6.47$ мкг/г, $[Nd] = 28.13$ мкг/г, $^{87}Rb/^{86}Sr = 0.4062$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.705036 \pm 22$, $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1380$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512642 \pm 14$. Расчет изохроны производился методом [15], во всех расчетах использовалась общепринятая константа распада рубидия — 1.42×10^{-11} лет [16]. Изотопный состав Nd приведен к табличному значению стандарта La Jolla ($^{143}Nd/^{144}Nd = 0.511860$).

Результаты проведенных Rb–Sr-изотопно-геохронологических исследований илейской вулканической толщи приведены в табл. 2 и отображены на рис. 5. Были проанализированы пять проб пород этой толщи — фельзитовые порфиры и пантеллериты. Полученная по ним изохрона имеет возраст 390.8 ± 7.4 млн лет, СКВО = 2.27 при достаточно высоком первичном изотопном отношении $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0 = 0.7148 \pm 21$, что может указывать на коровый источник кислых магматических расплавов. В частности, на участие относительно древнего корового источника в их образовании свидетельствуют и отрицательные значения величины $\epsilon_{Nd}(T)$ в породах (табл. 4).

Полученные геохронологические данные о возрасте субщелочных гранитов и вулканытов илейской толщи ~390 млн лет позволяют на основе имеющихся геологических данных связать образование Илейского рудопроявления с девонским этапом внутриплитного магматизма.

Изотопный состав Nd для субщелочных гранитов, рассчитанный на возраст их образования (табл. 4), составил $\epsilon_{Nd}(T) = -3.96$, для даек субщелочных гранитов -3.35 , для дайки щелочного

Таблица 2. Rb–Sr-изотопные данные для вулканытов Илейской толщи

№ образца	Состав	Rb, мкг/г	Sr, мкг/г	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr \pm 2s$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$
И-1/2	пантеллерит	155.7	30.66	14.82	0.79700 ± 2	0.71453
И-1/4	пантеллерит	133.5	31.36	12.41	0.78405 ± 3	0.71500
И-2/2	пантеллерит	135.1	10.2	39.15	0.93481 ± 2	0.71696
И-2/4	фельзит-порфир	235	7.57	94.52	1.24059 ± 3	0.71459
Ил-20/08	фельзит-порфир	192.6	10.57	54.27	1.01459 ± 2	0.71257

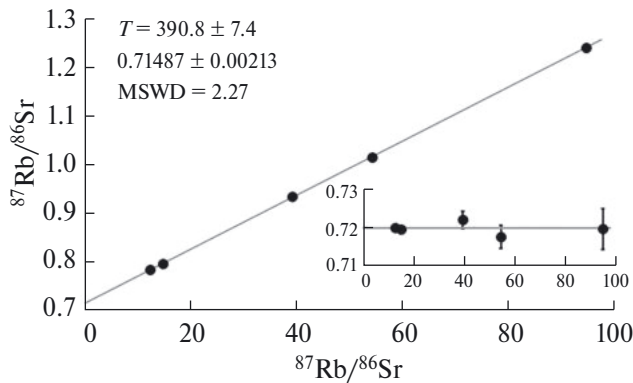


Рис. 5. Rb-Sr-изохронная диаграмма для вулканитов илейской толщи. Ar-Ar-геохронологические исследования были выполнены по арфведсониту, выделенному из субщелочных гранитов. Исследование было выполнено в ИГиМ СО РАН по методике, описанной в работе [17]. Плато, построенное по трем ступеням с 43.8% выделенного ³⁹Ar, характеризуется значением возраста 381±5 млн лет (табл. 3, рис. 6). На изохронной диаграмме для линейной регрессии по 4 точкам рассчитано значение возраста – 387±6 млн лет, согласующееся с возрастом плато (рис. 6 б). Таким образом, можно считать значение 387±6 млн лет соответствующим времени закрытия изотопной системы амфибола и времени становления субщелочных гранитов.

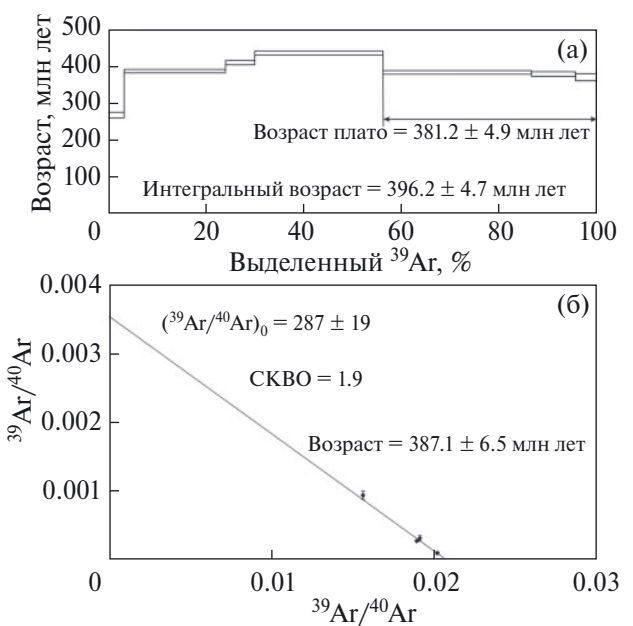


Рис. 6. Результаты Ar-Ar-исследований арфведсонита из субщелочных гранитов Илейского рудопрооявления. а – исследования арфведсонита методом ступенчатого прогрева; б – изохронная диаграмма для линейной регрессии, построенная по четырем точкам.

Таблица. 3. Результаты ⁴⁰Ar/³⁹Ar-датирования

<i>T</i> , °C	<i>t</i> , мин	⁴⁰ Ar(STP)	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	Ca/K	Σ ³⁹ Ar (%)	Возраст (млн лет) ±1σ	±1σ
Амфибол ИЛ-1/08, навеска 86,87 мг, <i>J</i> = 0.004914 ± 0.000063*; возраст промежуточного плато (950–1130 °C) = 381.2 ± 4.9 млн лет, интегральный возраст = 396.2 ± 4.7 млн лет														
500	10	9.9*е ^{−9}	40.918	0.133	0.0175	0.0036	0.21	1.09	0.0284	0.0031	0.77	3.3	267.6	7.7
650	10	81.1*е ^{−9}	52.903	0.036	0.0158	0.0003	0.61	0.28	0.0138	0.0006	2.21	24.0	387.9	4.7
750	10	24.4*е ^{−9}	55.243	0.101	0.0118	0.0016	0.04	0.49	0.0107	0.0018	0.16	30.0	411.0	6.0
850	10	112.6*е ^{−9}	58.071	0.076	0.0151	0.0008	0.61	0.24	0.0076	0.0012	2.21	56.2	437.4	5.5
950	10	111.2*е ^{−9}	49.587	0.056	0.0182	0.0007	0.77	0.13	0.0042	0.0010	2.76	86.5	384.5	4.9
1025	10	35.0*е ^{−9}	52.384	0.117	0.0144	0.0022	1.92	0.60	0.0158	0.0022	6.93	95.6	380.0	6.4
1130	10	20.9*е ^{−9}	64.111	0.267	0.0291	0.0023	0.89	1.30	0.0596	0.0040	3.22	100.0	371.3	9.7

* *J* – параметр, характеризующий величину нейтронного потока.

Таблица 4. Sm–Nd-изотопные данные для пород Илейского рудопрооявления

№ образца	Состав	Sm, мкг/г	Nd, мкг/г	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	<i>E</i> _{Nd} (<i>T</i>)	<i>T</i> _{Nd} (DM), млн лет	<i>T</i> _{Nd} (DM-2), млн лет
Ил-1/08	субщелочной гранит	17.47	108.7	0.10096	0.51220	−3.96	1290	1551
Ил-2/08	дайка субщелочного гранита	24.84	130.4	0.11971	0.51227	−3.35	1421	1426
Ил-4/08	дайка щелочного гранита	19.03	94.93	0.12593	0.512230	−3.25	1486	1392
Ил-28/08	известняк монгошинской свиты	0.272	1.41	0.12152	0.51218	−4.1	1601	1575
Ил-7/08	флюоритовая руда	0.352	1.709	0.12931	0.51226	−4.03	1601	1443

гранита —3.25, модельный $T_{Nd}(DM-2)$ возраст этих пород оценивается интервалом 1400–1550 млн лет. Эти данные, во-первых, отражают сходство изотопных источников кислых пород, участвовавших в образовании месторождения, во-вторых, указывают на участие в образовании кислых расплавов источника с мезопротерозойским Nd-изотопным модельным возрастом. Вероятным кандидатом на такое участие являются известняки монгошинской свиты, изотопный состав которых ($\epsilon_{Nd}(T) \sim -4$ близок к составу магматических пород. Изотопный состав флюоритовых руд (табл. 4) занимает промежуточную позицию между составами магматических пород и известняков, указывая тем самым, что они стали результатом воздействия магматических расплавов на карбонатную среду и, как следствие, приобрели промежуточные изотопные характеристики.

ВЫВОДЫ

Согласно геологическим данным, формирование редкометальной флюорит-фенакитовой минерализации Илейского рудопоявления произошло в результате взаимодействия обогащенного фтором и бериллием магматического флюида внедрением гранитоидов огнитского комплекса в известняки монгошинской свиты, которые стали геохимическим барьером для магматического флюида, обогащенного фтором и Be.

Полученные результаты геохронологических Rb–Sr- и Ar–Ar-исследований показали, что субщелочные граниты, а также кислые вулканы илейской толщи имеют среднедевонский возраст — 390–381 млн лет, что согласуется с оценками возраста для пород огнитского комплекса [18]. В хребте Кропоткина помимо рассмотренных образований района Илейского рудопоявления широко распространены также породы бимодального вулканоплутонического комплекса, включающего помимо базальтов, трахириодацитов-трахириолитов и комендитов щелочные граниты, граносиениты, сиениты и монзониты. Возраст этих образований был оценен в 402 млн лет [19]. Все это позволяет утверждать, что девонский магматизм получил достаточно широкое распространение в структурах Восточного Саяна и протекал на протяжении по меньшей мере 10–15 млн лет.

Сопряженность процессов магматизма и рудообразования на Илейском рудопоявлении свидетельствует о несомненном вкладе девонского магматизма в формирование редкометальной минерализации в пределах ВСМЗ, расширяя таким образом ее металлогенический потенциал.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны И.И. Куприяновой за многолетнее плодотворное содружество и предоставленные материалы по Илейскому рудопоявлению.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы выполнены в лаборатории редкометального магматизма ИГЕМ РАН в рамках базовой темы FMMN-2021-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добрецов Н.Л., Беличенко В.Г., Бутков Ю.П. и др. Геология и рудоносность Восточного Саяна. Новосибирск: Наука. 1989. 127 с.
<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/science/publications/monography-geologiya-i-rudonosnost-vostochnogo-sayan-1989-010464>
2. Гордиенко И.В., Рошкетев П.А., Гороховский Д.В. Окинский рудный район Восточного Саяна: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования и перспективы освоения // ГРМ. 2016. Т. 58. № 5. С. 405–429.
<https://uchimsya.com/a/ns200AsW>
3. Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Ernst R.E. Intraplate geodynamics and magmatism in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt // Journal of Asian Earth Sciences. 2014. V. 93. P. 158–179. <https://elibrary.ru/uezicf>
4. Ярмолюк В.В., Лыхин Д.А., Козловский А.М. и др. Состав, источники и механизмы формирования редкометальных гранитоидов позднепалеозойской Восточно-Саянской зоны щелочного магматизма (на примере массива Улан-Тологой) // Петрология. 2016. Т. 24. № 5. С. 515–536.
<https://doi.org/10.7868/S0869590316050083>
5. Лыхин Д.А., Ярмолюк В.В., Воронцов А.А. Возраст, состав и источники пород и руд Окуневского флюорит-лейкофанового месторождения (Западный Саян): К оценке вклада магматизма в формирование рудной минерализации // ГРМ. 2019. Т. 61. № 5. С. 37–61.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=41332166>
6. Владыкин Н.В., Алымова Н.В., Перфильев В.В. Геохимические особенности редкометальных гранитов Зашихинского массива, Восточный Саян // Петрология. 2016. Т. 24. № 5. С. 554–568. <https://doi.org/10.7868/S086959031605006X>
7. Воронцов А.А., Сандимиров И.В. Девонский магматизм хребта Кропоткина (Восточный Саян) и источники базальтов: геологические, геохимические и изотопные Sr–Nd данные // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 8. С. 1073–1087.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=15168156>
8. Лыхин Д.А., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б. и др. U–Pb возраст редкометальных щелочных гранитов месторождения Снежное: к оценке возрастной однородности гранитоидов огнитского комплекса (Восточный

- Саян) // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 148–157. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49421256>
9. Генетические типы гидротермальных месторождений бериллия / Гинзбург А.И., Заболотная Н.П., Куприянова И.И. и др. М.: Недра. 1975. <https://search.rsl.ru/ru/record/01006918784>
 10. Куприянова И.И., Шпанов Е.П. Бериллиевые месторождения России // М.: ВИМС. 2011. 353 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01005391656>
 11. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: magmatism in ocean basalts / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geol. Soc. London Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–346. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.
 12. Pearce Y.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rock // J. Petrol. 1984. V. 70. P. 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
 13. Саватенков В.М., Морозова И.М., Левский Л.К. Поведение изотопных систем (Sm-Nd, Rb-Sr, K-Ar, U-Pb) при щелочном метасоматозе // Геохимия. 2004. № 10. С. 1027–1049. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
 14. Котов А.Б., Ковач В.П., Сальникова Е.Б. и др. Этапы формирования континентальной коры центральной части Алданской гранулит-гнейсовой области: U-Pb и Sm-Nd изотопные данные по гранитоидам // Петрология. 1995. Т. 1. № 1. С. 97–108. <https://elibrary.ru/gkqfgr>
 15. York D. Least-squares fitting of a straight line. Can // J. Physics. 1966. V. 44. P. 1079–1086 <https://studylib.net/doc/18489580/york-d.-least-squares-fitting-of-a-straight-line>
 16. Steiger R.H., Jager E. Subcommission of Geochronology: conversion of the use of decay constants in geo- and cosmochemistry // Earth Planet. Sci. Lett. 1977. V. 36. № 2. P. 359–362. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90060-7)
 17. Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г. и др. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2009. Т. 11. С. 1181–1199. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12951863>
 18. Государственная геологическая карта Российской федерации масштаба 1:200000 N-47-XXIX (Алаг-Шулун). Объяснительная записка. ФГБУ “ВСЕГЕИ” Москва. 2019. https://www.geokniga.org/sites/geokniga/files/map_comments/n-47-xxix-alag-shulun-gosudarstvennaya-geologicheskaya-karta-rossiyskoy-fed.pdf
 19. Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Сандимирова Г.П. Базальт-трахириолит-комендитовая ассоциация хребта Кропоткина (Восточный Саян) и проблема девонского рифтогенеза в южном обрамлении Сибирской платформы // ДАН. 2008. Т. 423. № 2. С. 222–227. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11602255>

ILEI FLUORITE-PHENAKITE ORE PHENOMENON (EASTERN SAYAN): CONTRIBUTION OF DEVONIAN RIFTOGENIC MAGMATISM TO FORMATION OF EASTERN SAYAN RARE METAL METALLOGENIC ZONE

D. A. Lykhin^{a, #}, A. A. Vorontsov^b, Academician of the RAS V. V. Yarmolyuk^a

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

^b*A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: lykhind@rambler.ru*

Within the Altai-Sayan fold region, covering the territory of the East Tuva Highlands and Eastern Sayan, one of the richest rare metal provinces of Russia is concentrated. Deposits of rare metals, elements and lands formed within its limits have different ages and arose in different geotectonic environments and in different metallogenic eras. They are associated with the introduction of alkaline rock masses that are common along the fault system between the caledonids of the Altai-Sayan fold region and the Tuvino-Mongolian Precambrian superterrane. Their distribution range is also defined as the East Sayan rare metal metallogenic zone (VSMZ), which arose due to the impact of mantle plumes on the southwestern framing of the Siberian platform. Geochemical and geochronological studies were carried out at the Ilei fluorite-phenakite ore show. Ore development resulted from the introduction of Ognite complex granitoids into the limestones of the Mongoshin formation, which became a geochemical barrier to the igneous fluid enriched with fluorine and Be. Geochronological Rb-Sr and Ar-Ar studies have shown that subalkaline granites, as well as acidic volcanites of the Ilean sequence, are of Middle Devonian age ~ 390 million years, which is consistent with age estimates for the rocks of the Ognite complex. Thus, the same age of magmatism and ore formation at the Ilei ore phenomenon indicates the contribution of Devonian magmatism to the formation of rare metal mineralization within the VSMZ.

Keywords: fluorite-phenakite ore development, Devonian magmatism, rare metals, age, geochronology