

## Rb-Sr изотопное изучение базитов дайкового комплекса Тарынской рудно-магматической системы (Северо-Восток России)

А.И.ЗАЙЦЕВ, В.Ю.ФРИДОВСКИЙ (Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 39),

А.Е.ВЕРНИКОВСКАЯ (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН); 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3; Новосибирский государственный университет (НГУ), 630090, Новосибирск, ул. Пирогова),

М.В.КУДРИН, К.Ю.ЯКОВЛЕВА (Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 39),

П.И.КАДИЛЬНИКОВ (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН); 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3; Новосибирский государственный университет (НГУ), 630090, Новосибирск, ул. Пирогова)

Рассмотрена специфика петрографического и химического составов и возраст даек базитов Мало-Тарынского месторождения. Показано, что становление даек имело место в интервале 145–150 млн. лет. Определены *P-T* параметры кристаллизации даек. Породы формировались при повышенных значениях окислительного потенциала кислорода, в пределах магнетит-гематитового буфера с последующей редукцией при снижении температуры. Показана перспективность дайкового комплекса на формирование золоторудной минерализации.

*Ключевые слова:* базальты, Rb-Sr изотопный возраст, физико-химические параметры формирования, Мало-Тарынное месторождение.

Зайцев Альберт Иванович  
Фридовский Валерий Юрьевич  
Верниковская Антонина Евгеньевна  
Кудрин Максим Васильевич  
Яковлева Кюнной Юрьевна  
Кадильников Павел Игоревич



a.i.zaitsev@diamond.ysn.ru  
fridovsky@diamond.ysn.ru  
VernikovskayaAE@ipgg.sbras.ru  
kudrinmv@mail.ru  
aykyunney@mail.ru

## Rb-Sr isotope study of the basitic dyke complex of the Taryn ore-magmatic system (northeastern Russia)

A.I.ZAITSEV, V.Yu.FRIDOVSKY (Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences),

A.E.VERNIKOVSKAYA (A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Novosibirsk State University),

M.V.KUDRIN, K.Yu.YAKOVLEVA (Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences),

P.I.KADILNIKOV (A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Novosibirsk State University)

The nature of the petrographic and chemical compositions and the age of the basitic dykes of the Malo-Taryn ore field are considered. It is shown that dyke formation took place in 145–150 Ma range. The *P-T* crystallization parameters of andesite porphyrites are determined. The rocks were formed at elevated values of oxygen oxidation potential, within the magnetite-hematite buffer, followed by reduction as temperature decreased. The prospects of the dike complex for the formation of gold-sulfide mineralization within the ore field are shown.

*Key words:* basalts, Rb-Sr isotope age, physiochemical formation parameters, Malo-Taryn ore field.

В статье представлены результаты дальнейших исследований, направленных на выявление минерагенического потенциала магматизма Тарынской рудно-магматической системы, расположенной на юго-восточном фланге Тас-Кыстабытского пояса Верхояно-Колымской складчатой области [4]. Если гранитоиды плутонов Тарынской рудно-магматической системы относительно неплохо изучены и для них имеются датировки, полученные различными изотопными методами (K-Ar, Ar-Ar, Rb-Sr), определяющие их возраст в 142–145 млн. лет [4], то дайки практически не исследовались. В то же время знание последовательности формирования магматизма в геологической истории района и место в ней процессов рудообразования имеют определённое значение для оценки перспектив района при поисковых работах. Кроме того, изучение петрогенезиса даек позволяет оценить роль магматических процессов в гидротермальном рудообразовании и формировании золотой минерализации. Золотоносность даек довольно хорошо изучена в магаданской ветви Яно-Колымского пояса, где дайки были объектами промышленного освоения с середины 1930-х годов [2, 5, 6, 8, 9]. В начальный период изучения оруденение в дайках относили к золотокварцевому типу, в последние годы установлены его тесная связь с интрузивами («in-trusion-related») и участие магматических процессов в рудообразовании [5].

Дайковый комплекс Тарынской рудно-магматической системы авторы данной статьи изучали на примере Мало-Тарынского месторождения (МТМ), расположенного на границе Верхоянского складчато-надвигового и Кулар-Нерского сланцевого поясов. Положение месторождения контролируется Мало-Тарыньским разломом длительного развития [7] (рис. 1). В пределах МТМ развиты терригенные отложения триасового возраста (норий), представленные переслаиванием песчаников и алевролитов с прослоями песчаников, песчаных алевролитов и аргиллитов. В структурном плане МТМ расположено на юго-западном крыле Мало-Тарыньской синклинали Тарыно-Эльгинского синклинория. В отличие от других месторождений Тарыньского рудного узла, на северо-западе МТМ известны небольшие гранодиорит-гранитные плутоны (Самырский и Курдатский), а в пределах месторождения встречены мелкие единичные дайкообразные тела.

Данная работа посвящена изучению Rb-Sr систематики пород дайкового комплекса и оценке возраста его формирования в пределах МТМ, дайки которого представлены единичными телами, прорывающими терригенные породы триаса. Петрографические и петрохимические исследования проведены для даек участка Зелёный (рис. 2). Ряд даек приурочен к минерализованным зонам дробления Мало-Тарыньского разлома, где отмечается их интенсивное изменение и будинирование (см. рис. 2). Дайки северо-западной и север-северо-западной ориентировки, протяжённостью до первых десятков метров и мощностью 0,1–2,0 м.

**Петрография и химический состав даек.** Породы даек по минеральному составу, текстурным и структурным особенностям достаточно однотипны и относятся к семейству трахибазальтов. Идентификация минералогического состава пород дайкового комплекса затруднена в связи с их сильным гидротермальным изменением. Породы имеют серовато-зелёный цвет и массивный облик. Первичные минералы в них практически замещены тонкой смесью вторичных образований, среди которых рентгенофазовым анализом установлены серицит (от 21 до 33 об.%), хлорит (от 0 до 28 об.%), актинолит, карбонат (от 12 до 27 об.%) и кварц. Карбонат в основном представлен доломитом (от 12 до 26%), отдельными зёрнами сидерита до 1,5% и единичными зёрнами кальцита.

Краевые (МТД-6-16, МТД-7-16, МТД-10-16) и центральные зоны дайки (МТД 8-16, МТД 9-16) из вреза 3 (правый борт руч. Зелёный) отличаются по структурным и текстурным особенностям. Центральные зоны сложены неравномернозеристыми породами с венцовой структурой, массивной и порфиroidной текстурой. Для них характерны вкрапленники оливина (Ol) (до 10 мм), окружённые каймами амфибол+биотит+пироксен+серпентин (до 2 мм). Основная масса пород представлена агрегатом мелких зёрен калиевого полевого шпата (Fsp) и плагиоклаза (Pl) (до 1 мм). Присутствуют фрагменты долеритовой текстуры (рис. 3, А и Б). Краевые части дайки сложены породой с афировой и гиалопилитовой структурой, с флюидальной и миндалекаменной текстурой. Они содержат микролиты калишпата (Fsp) и плагиоклаза (Pl) размером до 0,2–0,5 мм, равномерно распределённые в породе (до 20 об.%). Породообразующие минералы часто замещены кальцит-серицит-хлорит-эпидотовым (Cal-Ser-Chl-Ep) агрегатом. В краевых зонах в отдельных шлифах установлены реликты порфиroidных вкрапленников Ol, Kfs и Crx (до 3–5 мм), а в основной массе выявлены плагиоклаз (Pl), калиевый полевой шпат (Kfs) и клинопироксен (Crx) (см. рис. 3, В и Г). Миндалины выполнены кальцитом. Акцессорные минералы представлены апатитом (Ap), сфеном (Sph), цирконом (Zrn), а рудные – гематитом (Hem), ильменитом (Ilm) и пирротинном (Pyr).

В породах дайки из канавы 181 (левой борт руч. Зелёный) установлена гломеропорфиroidная структура (см. рис. 3, Д). Для них характерно присутствие идиоморфных зёрен калиевого полевого шпата и пироксена, образующих скопления размером до 3 мм. Размер отдельных минеральных индивидов в скоплениях не превышает 0,25 мм. Калиевый шпат полностью замещён агрегатом серицита и глинистых минералов, а клинопироксен – биотит-хлоритовым агрегатом. Выделяются отдельные реликтовые зёрна изометричной и овальной форм, вероятно отвечающие оливину, замещённые агрегатом кварца и магнетита (см. рис. 3, Е). Основную массу породы образуют игольчатые выделения

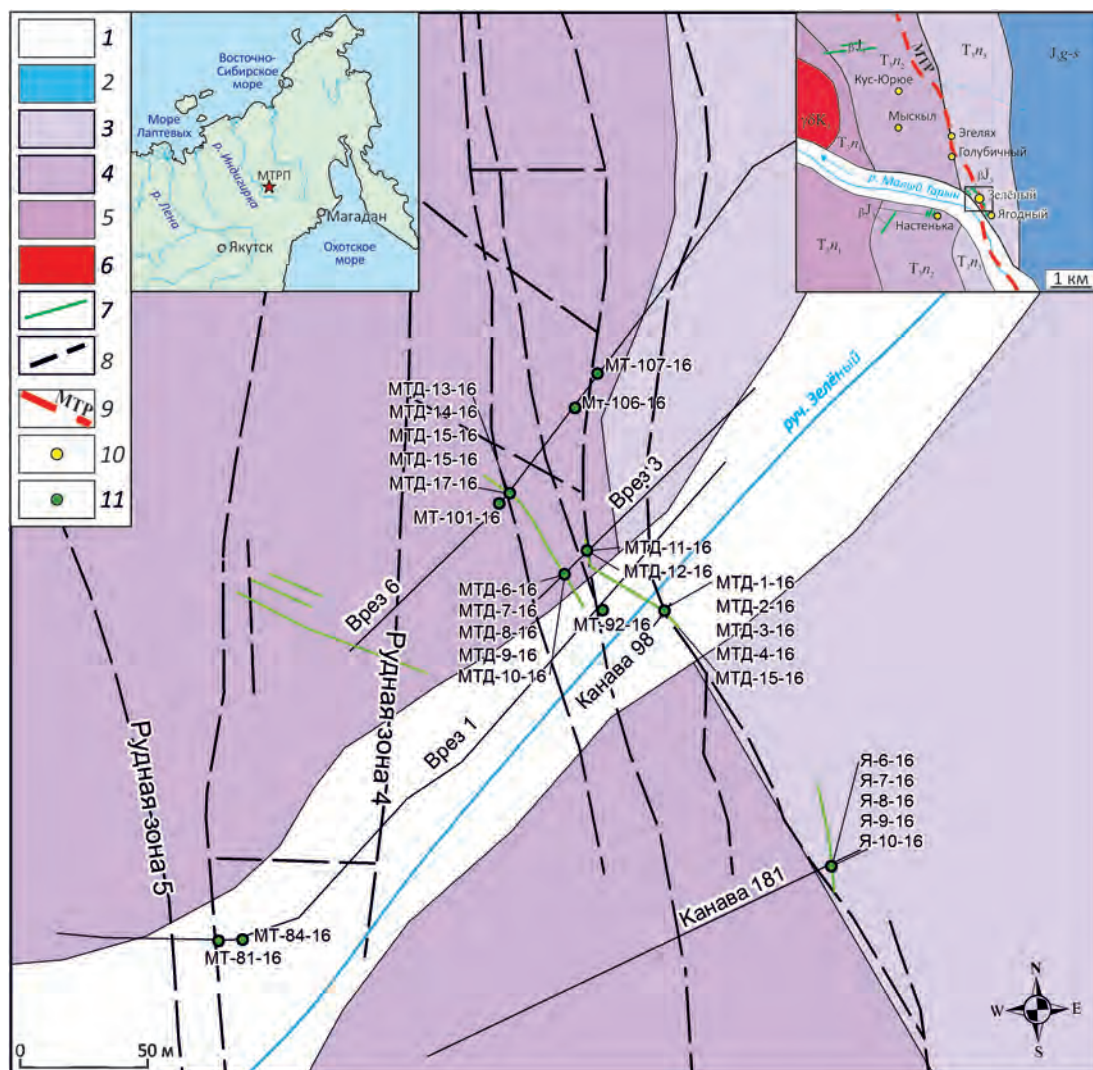


Рис. 1. Схема геологического строения южной части участка Зелёный Мало-Тарынского месторождения. Геологическая основа по А.В.Крючкову, 2006, с изменениями и дополнениями:

1–5 – отложения: 1 – четвертичные, 2 – нижнеюрские, 3–5 – верхнетриасовые, норийский ярус: 3 – верхний, 4 – средний и 5 – нижний подъярусы; 6 – Самырский массив гранитоидов; 7 – дайки базитов; 8 – разломы и рудные зоны; 9 – Мало-Тарынский разлом; 10 – золоторудные проявления Мало-Тарынского рудного поля; 11 – пробы и их номера

хлоритизированного биотита и тонкозернистый серицит-эпидот-карбонатный агрегат. Из рудных и акцессорных минералов присутствуют ильменит, сфен и циркон.

На классификационной диаграмме  $(K_2O+Na_2O)-SiO_2$  фигуративные точки химических составов пород (табл. 1) формируют поле между основными и средними породами, в пределах составов андезибазальтов (габбро-диоритов). По химическому составу они представляют собой щелочноземельную серию на границе с толеитовой серией, и по отношению  $K_2O$  к  $SiO_2$  они относятся к шошонитовой серии. Для пород характерна сильная вариация величин индекса глинозёмистости

(ASI) от металюминиевых до сильно пералюминиевых значений (0,81–1,81). В целом породы носят металюминиевый характер ( $ASI=0,90\pm 0,08$ ,  $n=16$ ), а отдельные образцы даек из контакта с рудными зонами имеют сильно пералюминиевую специфику ( $ASI=1,56\pm 0,13$ ,  $n=6$ ). Для образцов даек в рудных зонах и на контакте с ними также характерны повышенные значения отношения  $K_2O/Na_2O$  (24,09–38,38) при общей вариации величины этого параметра пород в значительных пределах (0,57–38,38). Сумма щелочных элементов ( $K_2O+Na_2O$ ) в целом для пород даек колеблется в интервале 2,35–3,97%. Между величинами  $K_2O/Na_2O$  и  $(K_2O+Na_2O)$

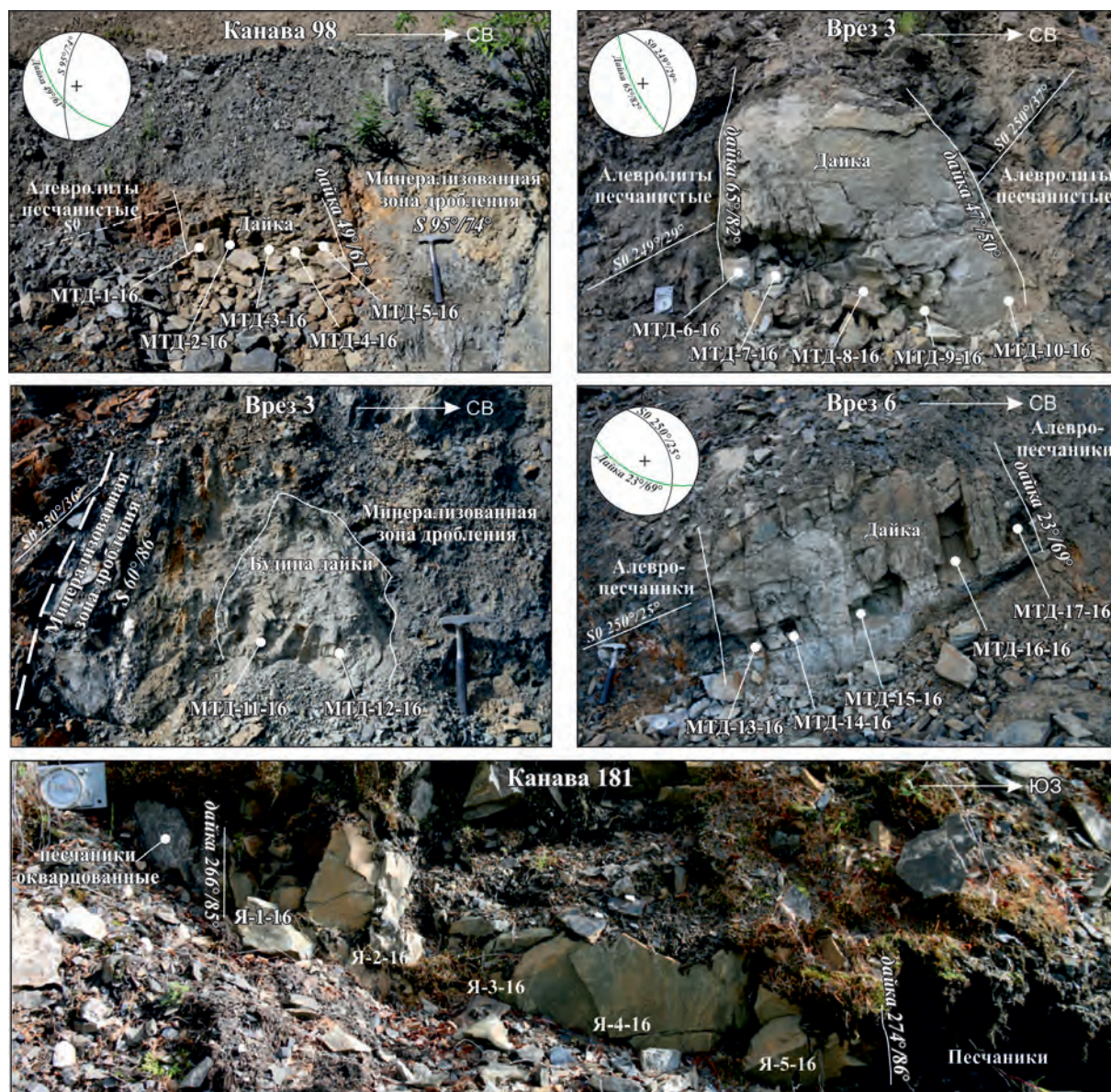


Рис. 2. Схема опробования даек базитов участка Зелёный Мало-Тарынского месторождения:

S0 – залегание слоистости; S – залегание разломов и рудных зон; построения выполнены на верхней полусфере сетки Вульфа

отмечается отрицательная зависимость ( $r=-0,442$ ), а между  $K_2O/Na_2O$  и ASI – значимая положительная корреляция ( $r=0,842$ ). Значительная вариация индекса глинозёмистости пород, величин отношения  $K_2O/Na_2O$  и характер корреляции между этими параметрами имеют непосредственную связь с воздействием на породы поздних гидротермальных процессов.

**Rb-Sr изотопное изучение даек.** Возраст даек по геологическим данным является позднеюрским, и они относятся к неро-бохачинскому комплексу [3]. Дайки сходного состава за пределами МТМ метаморфизованы вследствие гранодиоритового магматизма Самыр-

ского и Курдатского массивов, формирование которых, по данным изотопного датирования, имело место не позднее 140–145 млн. лет [4]. Ранние K-Ar датировки даек диоритовых порфиритов и андезитовых порфиритов из окрестностей Курдатского массива, определённые по пяти образцам, характеризуют их возраст в интервале 136–169 млн. лет (неопубликованные данные, архив Лаборатории МСМА ИГ СО РАН, г. Якутск) и в среднем равны  $148 \pm 12$  млн. лет. Сильная изменённость пород ограничивает достоверность значений K-Ar изотопных дат и требует дополнительных изотопных исследований. Авторами проведено Rb-Sr изотопное

1. Химический состав даек базитов Мало-Тарынского месторождения

Компоненты	Образцы									
	Я-6-16	Я-7-16	Я-8-16	Я-9-16	Я-10-16	МТД-1-16	МТД-2-16	МТД-3-16	МТД-4-16	МТД-5-16
	Место отбора									
	Канавка 181					Канавка 98				
SiO <sub>2</sub>	46,47	45,5	46,63	45,74	44,96	49,43	47,66	48,12	48,25	47,81
TiO <sub>2</sub>	0,91	0,97	0,84	0,89	0,89	1,08	0,94	1,05	1,17	1,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,4	14,74	13,96	13,91	15,18	16,18	14,78	16,84	17,79	17,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,76	2,59	1,91	2,49	2,22	2,03	0,99	2,13	2,66	3,11
FeO	4,97	5,00	4,75	4,90	5,59	5,4	5,61	5,17	5,69	5,12
MnO	0,04	0,04	0,09	0,01	0,01	0,04	0,03	0,03	0,05	0,03
MgO	6,15	6,51	6,26	6,62	6,59	5,94	6,87	6,71	6,6	6,06
CaO	5,9	6,74	7,25	7,17	6,74	4,57	6,44	4,54	3,83	4,38
Na <sub>2</sub> O	1,01	0,52	0,91	0,77	0,55	0,11	0,63	0,37	0,09	0,07
K <sub>2</sub> O	2,53	2,52	2,41	2,19	2,54	2,65	2,04	2,51	2,49	2,78
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,08	0,2	0,16	0,24	0,2	0,24	0,06	0,2	0,24	0,46
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	3,34	3,45	3,06	3,10	3,57	4,97	3,98	4,77	4,95	4,78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0	0	0,33	0,22	0,25	0,26	0	0
CO <sub>2</sub>	9,85	11,28	11,26	11,7	10,84	6,74	9,58	6,72	5,77	6,29
S	0,01	0	0,01	0,04	0,04	0,07	0,04	0,08	0	0,34
F	0,07	0,06	0,06	0,05	0,06	0,03	0,01	0,04	0,04	0,05
Σ	99,4	99,89	99,39	99,55	100,09	99,46	99,86	99,33	99,36	99,54
Cr	350	240	350	350	340	310	300	300	310	270
Ni	49	34	47	60	43	45	36	35	50	43
V	110	87	120	120	120	130	110	100	130	110
Sc	33	26	30	23	32	33	23	34	35	27
Co	17	14	21	34	16	22	14	18	22	22
Ba	440	380	400	390	590	380	290	310	350	380
Rb	83,1	84,5	79,1	74,5	78,9	90,6	76,2	92,8	96,3	98,3
Sr	560	533	586	651	587	405	660	474	361	400
Nb	8,6	32	5,9	8,5	11	15	12	17	16	24
Zr	130	150	110	110	130	150	120	130	140	160
Y	17	21	16	15	19	18	18	19	18	21
Yb	2,5	2,9	2,2	2,4	2,7	3,0	2,5	2,4	2,8	3,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO	7,73	7,59	6,06	7,39	7,81	7,43	6,60	7,30	8,35	8,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	0,56	0,52	0,46	0,51	0,40	0,38	0,18	0,41	0,47	0,61
ASI	1,08	0,93	0,81	0,83	0,95	1,42	0,99	1,45	1,81	1,59
Rb/Sr	0,149	0,158	0,135	0,114	0,134	0,224	0,115	0,196	0,267	0,246
K/Rb	254	248	254	245	268	244	223	225	215	236
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	3,54	3,04	3,32	2,96	3,09	2,76	2,67	2,88	2,58	2,85
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	2,50	4,85	5,88	2,84	4,70	24,09	3,24	6,78	27,67	39,71

Примечание. Анализы выполнены в отделе физико-химических методов исследований ИГАБМ СО РАН под руководством

изучение пород даек в пределах МТМ. Учитывая значительную степень изменённости (карбонатизация и др.) пород, для ряда образцов была использована дополнительная методика мягкой кислотной обработки пород, что позволило измерять параметры Rb-Sr системы пород в трёх аликвотах (валовая проба, силикатная и карбонатная фракции). Детально методика кислотного выщелачивания описана в работе [1]. Для валовой по-

роды и силикатной фракции породы анализировалось содержание в них <sup>87</sup>Rb и <sup>86</sup>Sr и изотопный состав Sr, а для карбонатной фракции определялось только содержание <sup>86</sup>Sr и изотопный состав Sr. При кислотной обработке проб определялся вес карбонатной фракции и его доля в породе (в %). Следует отметить, что величина карбонатной фракции в породе, определённая при выщелачивании образцов, достаточно близко совпадает

Компоненты	Образцы											
	МТД-6-16	МТД-7-16	МТД-8-16	МТД-9-16	МТД-10-16	МТД-11-16	МТД-12-16	МТД-13-16	МТД-14-16	МТД-15-16	МТД-16-16	МТД-17-16
	Место отбора											
	Врез 3						Врез 6					
SiO <sub>2</sub>	46,45	47,26	46,07	44,14	42,51	49,19	50,82	46,86	48,75	46,04	47,34	48,22
TiO <sub>2</sub>	0,96	0,89	0,9	1,04	0,86	1,08	1,00	0,86	0,97	0,9	0,96	0,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,88	14,56	14,55	15,17	13,86	16,95	17,07	14,29	14,51	14,79	14,29	14,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,85	2,15	1,49	2,32	2,54	2,86	2,92	1,96	1,93	2,89	0,91	2,61
FeO	4,56	4,46	4,71	4,46	6,00	5,70	4,83	4,14	4,08	4,55	4,74	4,71
MnO	0,03	0,08	0,10	0,07	0,03	0,03	0,04	0,1	0,03	0,05	0,03	0,08
MgO	6,34	6,60	6,16	6,09	6,47	6,23	5,12	5,33	5,6	6,91	6,03	5,94
CaO	7,50	6,67	6,71	6,99	6,34	4,13	4,43	7,37	7,01	6,48	7,69	6,19
Na <sub>2</sub> O	0,78	0,89	2,00	1,61	0,52	0,07	0,08	0,83	0,59	1,96	0,19	0,1
K <sub>2</sub> O	2,13	2,02	1,97	2,21	2,54	2,63	3,07	2,57	2,3	1,5	2,22	2,34
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,04	0,04	0,10	0,08	0,22	0	0,18	0,24	0,06	0,22	0,06	0,24
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	2,98	3,35	2,82	2,81	3,83	4,46	4,29	3,99	3,19	3,43	3,20	3,68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0	0	0,04	0,03	0	0	0	0	0,01	0
CO <sub>2</sub>	11,91	10,38	11,83	12,68	13,78	6,18	5,66	10,98	10,7	9,81	11,81	9,65
S	0,06	0,03	0,07	0,04	0,02	0,01	0	0,04	0,11	0,02	0	0,01
F	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06
Σ	99,47	99,38	99,42	99,67	99,38	99,58	99,36	99,36	99,81	99,37	99,46	99,38
Cr	290	280	280	280	390	320	240	310	240	260	260	350
Ni	37	33	29	34	82	36	58	33	35	36	29	48
V	120	110	100	120	110	120	130	120	97	130	100	110
Sc	23	29	23	29	30	31	25	25	36	26	25	24
Co	24	15	14	20	26	18	25	16	9,2	18	19	19
Ba	350	350	310	300	440	430	560	550	430	410	340	530
Rb	76,3	69,6	68,4	80,9	85,9	87,0	100,7	94,0	88,8	92,4	85,1	91,6
Sr	676	636	757	788	532	298	385	738	584	984	646	521
Nb	8,2	24	8,9	7,8	6,8	14	12	15	23	6,9	9,2	16
Zr	110	160	110	130	120	140	150	110	150	110	110	130
Y	14	18	19	16	18	17	19	15	19	16	14	17
Yb	2,1	2,6	2,2	2,6	2,9	2,5	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO	6,21	6,31	6,20	6,78	8,54	8,56	7,75	6,10	6,01	7,44	5,65	7,32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	0,41	0,48	0,32	0,52	0,42	0,50	0,60	0,47	0,47	0,64	0,19	0,55
ASI	0,81	0,92	0,83	0,86	0,92	1,62	1,48	0,82	0,90	0,89	0,86	1,07
Rb/Sr	0,113	0,109	0,090	0,103	0,160	0,293	0,262	0,127	0,152	0,094	0,132	0,146
K/Rb	232	242	240	228	246	252	254	228	216	135	217	213
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	2,91	2,91	3,97	3,82	3,06	2,70	3,15	3,40	2,89	3,46	2,41	2,35
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	2,73	2,27	0,98	1,37	4,88	37,57	38,38	3,10	3,90	7,65	11,68	23,40

Л.Т.Галенчиковой, ASI – индекс алюминиевого насыщения (ASI=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)).

с данными, полученными при их рентгенофазовом анализе (табл. 2).

Результаты Rb-Sr изотопных исследований пород приведены в таблице 3. Вариация величин содержаний <sup>87</sup>Rb пород относительно незначительная (от 19,38 до 26,31 мкг/г) и положительно коррелируется с величинами отношений K/Na ( $r=0,66$ ) и индекса глинозёмистости (ASI) ( $r=0,64$ ), подразумевая, что часть рубидия,

вероятно, связана с поздними наложенными процессами. В силикатной фракции пород содержание рубидия в целом более высокое (21,08–43,88 мкг/г).

Для пород характерно значительное колебание содержаний стронция (от 28,82 до 95,44 мкг/г), при этом его концентрация в породе в первую очередь определяется наличием здесь карбонатных минералов и содержанием в них этого элемента. По данным

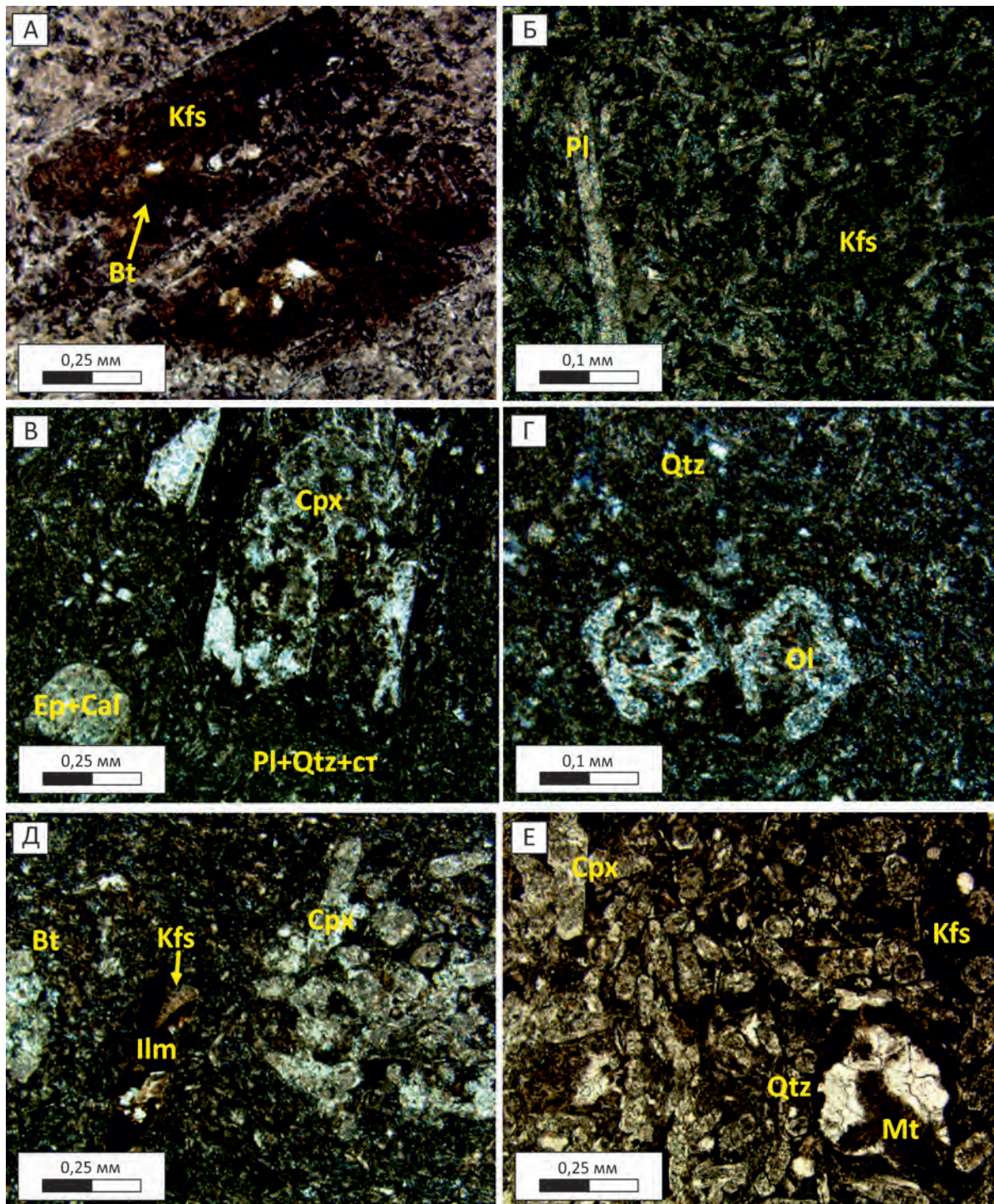


Рис. 3. Структурные особенности магматических пород участка Зелёный Мало-Тарынского месторождения:

А – гиалопилитовая структура основной массы, вкрапленники клинопироксена (Срх), замещённые кальцитом+эпидотом (СаI+Ер) агрегатом (обр. № МТД-10-16); Б – реликты ромбовидных зёрен оливина (ОI), в основной массе интерсертальный кварц (Qtz) (обр. № МТД-10-16); В – идиоморфное выделение калиевого полевого шпата (Kfs) (пелитизация), гиалопилитовая основная масса (обр. № МТД-1-16); Г – трахитоидная структура, лейсты плагиоклаза (Pl) и микролиты калиевого полевого шпата (Kfs) (обр. № МТД-6-16); Д – гломеропорфировая структура, скопления клинопироксена (Срх), опациitized зерно калиевого полевого шпата (Kfs) (обр. № Я-7-16); Е – изометричные и овальные зёрна оливина (ОI), замещённые агрегатом кварца и магнетита (обр. № Я-9-16); проходящий свет: В, Е – николи параллельны, А, Б, Г, Д – николи скрещены; сокращённые обозначения минералов по работе [15]

2. Содержание и изотопный состав стронция в карбонатной фракции в породах дайкового комплекса Мало-Тарынского месторождения

Образцы	% карбоната в породе		<sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	Образцы	% карбоната в породе		<sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
	РФА	МВ				РФА	МВ		
МТД-2-16	20	23,22	231,5	0,7101	МТД-11-16	14	16,14	160,5	0,7085
МТД-3-16	15	15,65	232,2	0,7099	МТД-15-16	20	24,06	330,0	0,7111
МТД-6-16	27	27,19	199,4	0,7110	МТД-16-16	22	23,14	255,2	0,7107
МТД-8-16	26	24,32	185,9	0,7087					

Примечание. РФА – рентгенофазовый анализ (дифрактометр D2 PHASER фирмы Bruker, Германия, CuKα излучение, 30 кВ, 10 мА); анализы выполнены под руководством Н.В.Заякиной (ИГАБМ СО РАН); МВ – метод выщелачивания; <sup>86</sup>Sr измерено в мкг/г.

выщелачивания, содержание Sr в карбонатах достаточно высокое – 160,5–320,9 мкг/г (см. табл. 2) – и вполне сопоставимое с таковым в гидротермальных карбонатах – 168,8–309,9 мкг/г (см. табл. 3). На связь концентрации Sr в валовом составе пород и содержания в них количества карбонатного материала указывает и наличие между ними положительной корреляция ( $r=0,65$ ).

В силикатной фракции пород содержание стронция заметно меньше (3,46–37,30 мкг/г). Следует также отметить пониженное содержание Sr в образцах из даек на контакте с рудной зоной и внутри рудной зоны (28,80–38,80 мкг/г). Величины отношения <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr в валовом составе пород невысокие (0,2609–0,4665), повышаются на границе с рудной зоной и в её пределах (0,7079–0,8460). Для силикатной фракции породы вариация этого параметра достигает более высоких значений (0,661–8,8225), что позволяет использовать эти данные для Rb-Sr изохронного анализа пород.

На рис. 4 приведены графики зависимости <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr–<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr для образцов даек участка Зелёный МТМ. Для всех проб, исключая канаву 181, наблюдается положительная зависимость между параметрами <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr и <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr. Для дайки, вскрытой канавой 181, зависимость между этими параметрами отрицательная (см. рис. 4, А), что, по-видимому, обусловлено влиянием изменений пород дайки карбонатным веществом, имеющим повышенное содержание стронция. Дайка из канавы 98 по всей совокупности образцов (см. рис. 4, Б) с учётом аликвот их силикатной фракции характеризуется датировкой 138±13 млн. лет ( $n=6$ ), с первичным изотопным составом Sr ( $I_0=0,7106±0,0007$ ). При исключении из расчётов двух образцов, локализованных непосредственно на контакте, Rb-Sr изохронная оценка возраста составляет 144±4 млн. лет и  $I_0=0,7104±0,0001$  ( $n=4$ ). Образец из центра дайки по двухточечной изохроне (валовая порода – силикатная фракция образца) характеризуется более древней датировкой 158 млн. лет ( $I_0=0,7099$ ). Образцы из дайки врез 6 (см. рис. 4, Г) дают эрохрону возрастом 148±27 млн. лет и  $I_0=0,7101±0,0004$  ( $n=7$ ). Образец МТД-6-16 в контакте лежащего бока тела по

двухточечной изохроне (валовая порода – силикатная фракция) даёт более молодое значение возраста 115 млн. лет ( $I_0=0,7113$ ). Здесь же для будины из дайки рудной зоны получена датировка 146±17 млн. лет и  $I_0=0,7098±0,0012$  ( $n=3$ ), а для образца из центра будинированной дайки по двухточечной изохроне (порода – силикатная фракция) – 156 млн. лет ( $I_0=0,7086$ ). Для всей совокупности образцов из этой дайки, включая образцы из её будинированной части в рудной зоне, получена датировка 145±8 млн. лет ( $I_0=0,7101±0,0003$ ,  $n=10$ ). Близкий возраст 149±3 млн. лет ( $I_0=0,7107±0,0001$ ,  $n=7$ ) определён и для дайки во врезе 6. В целом точки пород изученных даек МТМ из всех участков их отбора формируют на диаграмме <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr–<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (см. рис. 4, Д) положительную зависимость эрохронного характера, которая оценивает возраст пород в 146±5 млн. лет ( $I_0=0,7104±0,0001$ ,  $n=28$ ). Аналогичное значение Rb-Sr возраста получено по образцам из центральных частей даек – 145±7 млн. лет ( $I_0=0,7101±0,0003$ ,  $n=9$ ) и несколько древнее для образцов, удалённых от центра – 150±6 млн. лет ( $I_0=0,7105±0,0002$ ,  $n=19$ ). Учитывая значительную степень изменения пород даек и эрохронный характер зависимостей параметров Rb-Sr системы пород, используемых для их датирования, полученные датировки, вероятнее всего, отвечают времени модификации пород даек в интервале 145–150 млн. лет. Формирование даек, возможно, имело место несколько ранее, в интервале 155–160 млн. лет. Рассчитанные значения первичного изотопного состава ( $I_0$ ) в породах дайки являются относительно высокими (0,7086–0,7107) и, вероятно, обусловлены вторичным изменением пород и в большей мере за счёт их карбонатизации. Гидротермальные карбонатные прожилки в пределах развития дайкового комплекса МТМ характеризуются высокими содержаниями Sr и достаточно высокими изотопными отношениями элемента (см. табл. 3).

**Физико-химические условия формирования даек.** Высокая степень изменённости субщелочных метавулканитов основного состава дайкового комплекса не позволяет восстановить реальную картину условий их



3. Результаты Rb-Sr изотопных исследований базитов из дайкового комплекса Мало-Тарынского месторождения

Образцы*	Характеристика пород	<sup>87</sup> Rb	<sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
Канавка 181					
Я-6-16	Дайка	23,5469	54,3311	0,4284	0,7114
Я-7-16	Дайка	23,9517	51,7268	0,4577	0,7109
Я-8-16	Дайка	22,4125	56,8495	0,3897	0,7105
Я-9-16	Дайка	21,1063	65,1282	0,3203	0,7117
Я-10-16	Дайка	22,3616	56,9537	0,3881	0,7114
Канавка 98					
МТД-1-16	Дайка	25,6836	39,3137	0,6458	0,7122
МТД-2-16	Дайка	21,6085	64,0049	0,3337	0,7112
то же	То же, силикатная фракция	29,8101	13,3414	2,2088	0,7375
МТД-3-16	Дайка	26,3123	45,9716	0,5658	0,711
то же	То же, силикатная фракция	26,6299	11,4145	2,3062	0,7151
МТД-4-16	Дайка	27,2941	34,9765	0,7714	0,7119
МТД-5-16	Дайка	27,8625	38,7973	0,7099	0,7123
Врез 3					
МТД-6-16	Дайка	21,6256	65,5949	0,3259	0,7118
	То же, силикатная фракция	43,8843	15,6403	2,7736	0,7158
МТД-7-16	Дайка	19,7304	61,6597	0,3163	0,7097
МТД-8-16	Дайка	19,3854	73,4469	0,2609	0,7101
МТД-8-16	То же, силикатная фракция	24,9409	37,2989	0,6610	0,7124
МТД-9-16	Дайка	22,9355	76,4029	0,2967	0,7103
МТД-10-16	Дайка	24,363	51,6231	0,4665	0,7115
МТД-11-16	Дайка	24,6577	28,8118	0,846	0,7105
МТД-11-16	То же, силикатная фракция	30,8809	3,46	8,8225	0,7282
МТД-12-16	Дайка	28,5515	37,3564	0,7555	0,7125
Врез 6					
МТД-13-16	Дайка	26,6623	71,5529	0,3683	0,7117
МТД-14-16	Дайка	25,1594	56,6307	0,4392	0,7118
МТД-15-16	Дайка	26,1954	95,4388	0,2713	0,7113
МТД-15-16	То же, силикатная фракция	21,0753	21,1501	0,985	0,7124
МТД-16-16	Дайка	24,1106	62,6622	0,3803	0,7116
МТД-16-16	То же, силикатная фракция	33,9688	4,7085	7,1314	0,7259
МТД-17-16	Дайка	25,986	50,5178	0,5085	0,7121
МТ-101-16	Карбонатный прожилок, сечёт кварцевую жилу	0,0763	175,0984	0,00043	0,7114
МТ-106-16	То же, там же, с сульфидами	0,3638	250,5144	0,00144	0,7108
МТ-107-16	То же, там же	0,0737	168,8754	0,00043	0,7111
Врез 01					
МТ-81-16	Карбонатный прожилок сечёт кварц	0,0763	226,6416	0,00033	0,7116
МТ-84-16	То же, там же	0,0564	275,9953	0,0002	0,7126
МТ-92-16	Кальцитовая жила с гнездами пирита в зальбанде	0,2192	309,9214	0,0007	0,7117

Примечание. \* – места отбора проб см. на рисунках 1 и 2.

кристаллизации. Учитывая, что Ti и Zr в процессе изменения пород являются относительно малоподвижными компонентами, авторы для оценки температур формирования пород использовали термометры насыщения пород титаном (рутилом) [10] и цирконом [12]. Для сравнения также был применён термометр насыщения пород апатитом [12], с помощью которого, предположи-

тельно, можно определять условия мобильности фосфора в гидротермальном процессе. Кроме того, была рассчитана фугитивность кислорода ( $fO_2$ ) и её значения относительно Ni-NiO буфера ( $\Delta Ni-NiO$ ) [14]. Анализ полученных данных (табл. 4) показывает, что температура формирования пород, определённая по разным геотермометрам, несколько различна. Наиболее

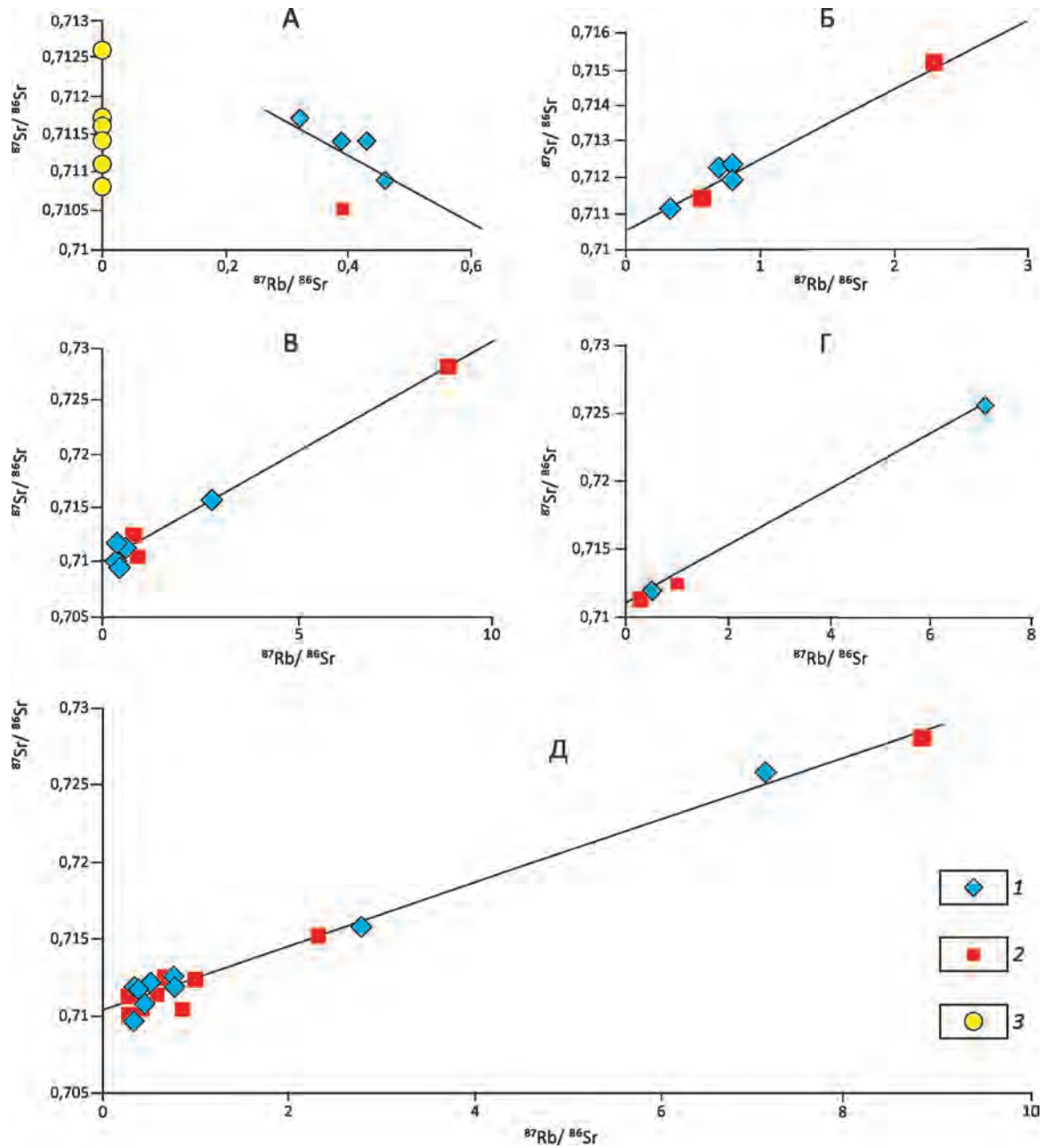


Рис. 4. Rb-Sr изохронная диаграмма для базитов дайкового комплекса Мало-Тарынского месторождения:

канавы: А – 181 и Б – 98; В – дайка и будина дайки в рудной зоне врез 3; Г – врез 6; Д – по всей совокупности пород из всех участков отбора проб: 1 – базиты, контактовая и промежуточная зоны; 2 – базиты, центр дайки; 3 – карбонат из прожилков, врез 6 и 01

высокие температуры формирования пород оценены по титановому геотермометру – 740–854°C (среднее 795±34°C, n=22), более низкие – по циркониевому геотермометру – 688–798°C (среднее 731±39°C, n=22), а температуры по апатитовому геотермометру, определённые по 7 образцам, варьируют в широких пределах от 420° до 723°C, указывая на более низкотем-

пературный характер модификации состава даек при последующих процессах.

Формирование пород изученных даек происходило при относительно варьирующих окислительных условиях ( $\Delta Ni-NiO$  от 4,08 до 0,88), то есть практически в условиях магнетит-гематитового буфера. Между температурой формирования пород и величиной  $\Delta Ni-NiO$

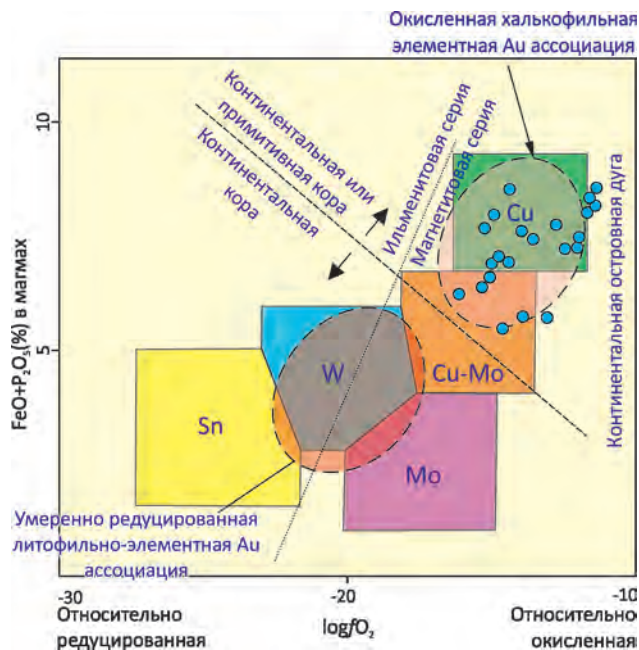


Рис. 5 Схематическая диаграмма связи между степенью фракционирования ( $Fe_2O_3+FeO$ ) и окисленным состоянием магм ( $fO_2$ ), ассоциирующими с различными парагенезисами металлов по работе [11] применительно к субщелочным метавулканитам основного состава Мало-Тарынского месторождения

отмечается хорошая положительная корреляция ( $r=0,89, n=22$ ), указывающая на то, что при снижении температуры происходит относительное повышение восстановительных условий среды их становления. Согласно Д.Р.Мэйсону [13], изначально повышенный кислородный окислительный потенциал магмы ( $fO_2$ ) повышает перспективу её рудоносности. Как видно на диаграмме ( $Fe_2O_3+FeO$ )– $\log fO_2$  (рис. 5), точки составов пород дайкового комплекса МТМ практически полностью лежат в поле окисленной халькофильной Au ассоциации и, несмотря на некоторую условность данной металлогенической диаграммы, это, вероятно, указывает на возможную генетическую связь золотой минерализации МТМ с изученными породами дайкового комплекса в его пределах.

В заключение следует отметить, что породы дайкового комплекса, представленные трахибазальтами, являются наиболее ранними магматическими образованиями МТМ. Их состав в результате более поздних этапов тектонической активизации и сопровождающих их рудных процессов был значительно модифицирован. Полученные Rb-Sr эрохронные датировки пород даек предполагают, что их возраст не моложе 145–150 млн. лет и вероятное время их формирования 155–160 млн. лет. Величины первичного изотопного состава Sr пород, рассчитанные с учётом их Rb-Sr возраста,

4. Температуры формирования и величины фугитивности кислорода субщелочных метавулканитов основного состава МТМ

Образцы	$T_{Ti}$ °C	$T_{Zr}$ °C	$T_{Ap}$ °C	$\log(fO_2)$	$\Delta Ni-NiO$
Канавка 181					
Я-6-16	791	730	–	–13,415	2,74
Я-7-16	777	728	–	–13,627	2,58
Я-8-16	759	688	–	–15,592	1,66
Я-9-16	755	691	–	–15,002	2,16
Я-10-16	768	718	692	–14,114	2,34
Канавка 98					
МТД-1-16	840	786	722	–11,715	3,11
МТД-2-16	782	723	708	–15,210	1,21
МТД-3-16	832	772	721	–11,804	3,34
МТД-4-16	854	798	–	–10,528	4,03
МТД-5-16	851	798	–	–10,481	4,08
Врез 3					
МТД-6-16	769	688	–	–15,546	1,70
МТД-7-16	777	736	–	–13,652	2,35
МТД-8-16	775	688	–	–16,143	1,11
МТД-9-16	786	701	–	–14,877	2,02
МТД-10-16	740	705	430	–14,520	2,27
МТД-11-16	843	790	550	–10,893	3,84
МТД-12-16	854	791	–	–10,926	3,79
Врез 6					
МТД-13-16	780	692	–	–15,531	1,79
МТД-14-16	802	732	–	–13,921	2,18
МТД-15-16	769	697	–	–14,614	2,39
МТД-16-16	783	700	420	–16,042	0,88
МТД-17-16	798	742	–	–12,852	3,00

*Примечание.* Оценка температур и величин фугитивности кислорода произведена по химическим анализам пород; температура насыщения:  $T_{Ti}$  °C – рутилом [1],  $T_{Zr}$  °C – цирконом [7],  $T_{Ap}$  °C – апатитом [7];  $\log(fO_2)$  – значения фугитивности кислорода, рассчитанные при  $T_{Zr}$  °C и  $P=100$  МПа [6],  $\Delta Ni-NiO$  – то же, но относительно фугитивности Ni-NiO буфера.

имеют относительно высокие значения (0,7086–0,7107) и, по-видимому, связаны со вторичным изменением пород и в большей мере обусловлены их карбонатизацией. Температура формирования пород по Ti- и Zr-геобарометрам, рассчитанная по породе, находится в пределах 740°–854°С и 688°–798°С. Становление пород даек происходило в условиях относительно высокого окислительного потенциала кислорода ( $\Delta NiO-Ni=0,88-4,08$ ) практически близко к условиям магнетит-гематитового буфера. Характерно, что на контакте с рудной зоной и в её пределах в породах резко увеличиваются значения  $K_2O/Na_2O$  до 24–39 и величины индекса глинозёмистости (ASI) до 1,45–1,81, что вероятно обусловлено наложением на породы даек поздних гидротермальных

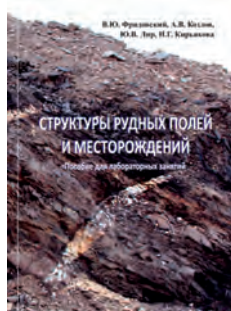
и связанных с ними рудных процессов. Существует вероятность близкой генетической связи золотой минерализации МТМ с изученными породами дайкового комплекса в его пределах.

Работа выполнена по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект № 0381-2016-0004.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геохронология и изотопная геохимия карбонатов Якутии* / А.И.Зайцев, А.Р.Энтин, Н.И.Ненашев и др. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992.
2. *Горячев Н.А.* Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003.
3. *Государственная геологическая карта Российской Федерации.* Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-54 – Оймякон. Объяснительная записка / Г.Г.Казакова, А.Ф.Васькин, А.П.Кропачев и др. – С-Пб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 400 с.+6 вкл.
4. *Зайцев А.И., Фридовский В.Ю., Кудрин М.В.* Интенсивные параметры формирования и минерагенический потенциал гранитоидов Курдатского и Самырского массивов, Тас-Кыстабытский магматический пояс Верхояно-Колымской складчатой области // *Отечественная геология.* 2017. № 5. С. 80–89.
5. *Месторождения золота в дайках Яно-Колымского пояса* / А.В.Волков, В.Н.Егоров, В.Ю.Прокофьев и др. // *Геология рудных месторождений.* 2008. Т. 50. № 4. С. 311–337.
6. *Фирсов Л.В.* Золото-кварцевая формация Яно-Колымского пояса. – Новосибирск: Наука, 1985.
7. *Фридовский В.Ю., Гамянин Г.Н., Полуфунтикова Л.И.* Структуры, минералогия и флюидный режим формирования руд полигенного Малотарынского золоторудного поля (Северо-Восток России) // *Тихоокеанская геология.* 2015. Т. 34. № 4. С. 39–52.
8. *Шило Н.А.* Новый взгляд на роль даек в формировании рудных систем // *Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии.* – М.: ИГЕМ РАН. 2004. С. 25–34.
9. *Условия формирования золотого оруденения в структурах Северо-Востока СССР* / Н.А.Шило, В.И.Гончаров, А.В.Альшеевский и др. – М.: Наука, 1988.
10. *Hayden L.A., Watson E.B.* Rutile saturation in hydrous melts and its bearing on Ti-thermometry of quartz and zircon // *Earth and Planetary Science Letters.* 2007. Vol. 258. № 3–4. P. 561–568.
11. *Intrusion-related gold deposits associated with tungsten provinces* / J.F.H.Thompson, R.H.Sillitoe, T.Baker et al. // *Mineralium Deposita.* 1999. Vol. 34. P. 323–334.
12. *Janousek V., Farrow C.M., Erban V.* Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: Geochemical Data Toolkit (GCDkit) // *Journal of Petrology.* 2006. Vol. 47. № 6. P. 1255–1259.
13. *Mason D.R.* Compositions variations in ferromagnesian minerals from porphyry copper-generating and barren intrusions of the western Highlands, Papua New Guinea // *Economic Geology.* 1978. Vol. 73. Pp. 878–890.
14. *A Mossbauer study of the oxidation of Fe in silicate melts* / K.D.Jayasuriya, O, H.S.C.Neil, A.J.Berry, S.J.Cambell // *American Mineralogist.* 2004. Vol. 89. P. 1597–1609.
15. *Whitney D.L., Ewans B.W.* Abbreviations of names of rock-forming minerals // *Am. Miner.* 2010. Vol. 95. P. 185–187.

Вниманию преподавателей, аспирантов, студентов и магистрантов, изучающих структуры рудных полей и месторождений, предлагается учебное пособие



**Структуры рудных полей и месторождений: пособие для лабораторных занятий / В.Ю.Фридовский, А.В.Козлов, Ю.В.Лир, И.Г.Кирьякова. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. – 128 с.**

В пособии приведены сведения о складчатых, разрывных и трещинных структурах рудных полей и месторождений, рудных телах; рассмотрены основные методы, используемые при изучении строения рудных полей, месторождений и рудных тел; приведены специально подобранные задачи и примеры их решения, что позволит научить будущих геологов анализировать строение месторождений.