

Оригинальная статья

Вещественный состав мезозойских магматических пород Михайловского массива и малых тел Эвотинского рудного района (Южная Якутия, Алдано-Становой щит)

А. И. Иванов✉, М. С. Иванов, Е. Е. Лоскутов, А. И. Журавлев, В. Ф. Тимофеев

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉ aiivanov@diamond.ysn.ru

Аннотация

Рассмотрены особенности петрографического и геохимического составов мезозойских магматических пород Михайловского массива, силлов и даек Эвотинского рудного района, расположенного в центральной части Нимнырского террейна Алдано-Станового щита. На основе изучения петрографического и геохимического составов впервые установлено, что Михайловский массив сложен кварцевыми монцонитами, а силлы и дайки – кварцевыми сиенитами. По геохимическим характеристикам породы близки к шошонит-латитовой серии пород островных дуг. Породы обогащены LREE и обеднены HREE, характеризуются слабой отрицательной Eu-аномалией. Установлена последовательность развития магматизма в мезозое: образование пород Михайловского массива и большинства малых тел в постколлизийный, с последующим внедрением тел даек кварцевых сиенитов в анорогенный этап развития территории. Сделан вывод, что все изученные магматические породы северо-восточной части Эвотинского района характеризуются двойственностью геохимического состава, и это позволяет предполагать их образование либо в результате интенсивного мантийно-корового взаимодействия, либо при существовании на тот период времени двух источников как мантийного, так и корового происхождения.

Ключевые слова: Эвотинский рудный район, Михайловский массив, силл, дайки, кварцевые монцониты, сиениты

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания НИР ИГАБМ СО РАН.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за проведение аналитических работ сотрудникам ИГАБМ СО РАН Л.Т. Галенчиковой и С.Ю. Коркиной.

Для цитирования: Иванов А.И., Иванов М.С., Лоскутов Е.Е., Журавлев А.И., Тимофеев В.Ф. Вещественный состав мезозойских магматических пород Михайловского массива и малых тел Эвотинского рудного района (Южная Якутия, Алдано-Становой щит). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(4):550–559. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-550-559>

Original article

Material composition of the Mesozoic igneous rocks of the Mikhailovsky massif and small bodies of the Evotinskiy ore district (Southern Yakutia, Aldan-Stanovoi shield)

A. I. Ivanov✉, M. S. Ivanov, E. E. Loskutov, A. I. Zhuravlev, V. F. Timofeev

Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉ aiivanov@diamond.ysn.ru

Abstract

The petrographic and geochemical characteristics of the Mesozoic igneous rocks of the Mikhailovsky massif, including the sills and dikes of the Evotinsky ore district located in the central part of the Nimnir terrane of the Aldan-Stanovoy shield, were examined. This study revealed for the first time that the Mikhailovsky Massif is composed of quartz monzonites, while the sills and dikes are composed of quartz syenites. These rocks are geochemically close to

the shoshonite-latitude series of island arc rocks and are enriched in LREE and depleted in HREE, characterized by a weak negative Eu anomaly. The sequence of magmatism development in the Mesozoic has been established: the formation of rocks of the Mikhailovsky massif and most small bodies occurred in the post-collision period, followed by the intrusion of quartz syenite dike bodies in the anorogenic stages of territorial development. The study suggests that all the studied igneous rocks of the northeastern part of the Evotinsky region are characterized by a duality of geochemical composition, which indicates either intense mantle-crustal interaction or the existence of two sources of both mantle and crustal origin at that time.

Keywords: Evotinskiy ore district, Mikhailovskiy massif, sills, dikes, quartz monzonites, syenites

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the DPMGI SB RAS (number FUEM-2019-0001).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff of the DPMGI SB RAS, particularly to L.T. Galenchikova and S.Yu. Korkina for conducting analytical work.

For citation: Ivanov A.I., Ivanov M.S., Loskutov E.E., Zhuravlev A.I., Timofeev V.F. Material composition of the Mesozoic igneous rocks of the Mikhailovsky massif and small bodies of the Evotinskiy ore district (Southern Yakutia, Aldan-Stanovoi shield). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(4):550–559. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-550-559>

Введение

Изучение мезозойского магматизма Алдано-Станового щита проводится уже на протяжении более века, и начало его восходит к работам Ю.А. Билибина, который первый описал породы этого этапа и выделил алданский комплекс. Помимо выделения щелочных пород мезозойского возраста в отдельный комплекс, в своих работах Ю.А. Билибин также доказал пространственную и генетическую связь с ними золоторудных объектов [1]. В общемировой практике многие исследователи связывают образование крупных месторождений золота с щелочным магматизмом [2]. В работах Силлитое [2] отображена 20%-я зависимость крупных месторождений золота в мире с комплексами щелочной и шощонитовой петрохимическими сериями пород. За всю историю изучения мезозойского щелочного магматизма Алдано-Станового щита [3] подавляющее количество вопросов, связанных с процессами мезозойской тектоно-магматической активизации территории, остаются дискуссионными. В Эвотинском рудном районе, входящем в состав Нимнырского террейна, помимо многофазовых мезозойских магматических структур сиенит-монцонитовой формации [4], сосредоточены выходы небольших штоков, одним из которых является слабо изученный Михайловский массив, а также многочисленные тела даек и силлов (рис. 1).

В связи с этим основной целью нашей работы является изучение петрографических и геохимических характеристик составов магматических пород Михайловского массива и малых тел во взаимосвязи с определением геодинамиче-

ской обстановки, существовавшей на тот период, и характера магмоформирующих субстратов.

Материалы и аналитические методы

Петрографическое описание пород сделано на поляризационном микроскопе МИН-8 в 40 прозрачных шлифах. Фотографирование различных масштабов произведено с помощью микроскопа Olympus BX50, при увеличении X25, X40, X100, с камерой Zeiss Axio CamICc3.

Элементы группы Fe пород определялись методами силикатного анализа (Галенчикова Л.Т.) и многоканальной атомно-эмиссионной спектроскопии (МАЭС+PGS-2, аналитик Коркина С.Ю.) в отделе физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН (г. Якутск). Всего проанализировано 30 проб. Содержания микроэлементов в рассматриваемых породах определялись при помощи масс-спектрометра ELAN (ICP MS) модель DRC-е в лаборатории ООО «ХАЦ «Плазма» (г. Томск) общим количеством 10 проб.

Краткая геология и петрография магматических пород

Михайловский массив на современном уровне эрозионного среза имеет форму неправильного эллипсоида, длинная ось которого ориентирована в северо-восточном направлении (см. рис. 1). Образования массива представлены темно-розовато-серыми кварцевыми монцонитами, в которых отмечаются обильные ксенолиты различных по составу и размерам кристаллосланцев. Контакты с вмещающими породами (архейские граниты) четкие, местами плавного магматического характера. В центральной части массива отмечается зона интенсивно окварцованных и ожелезнен-

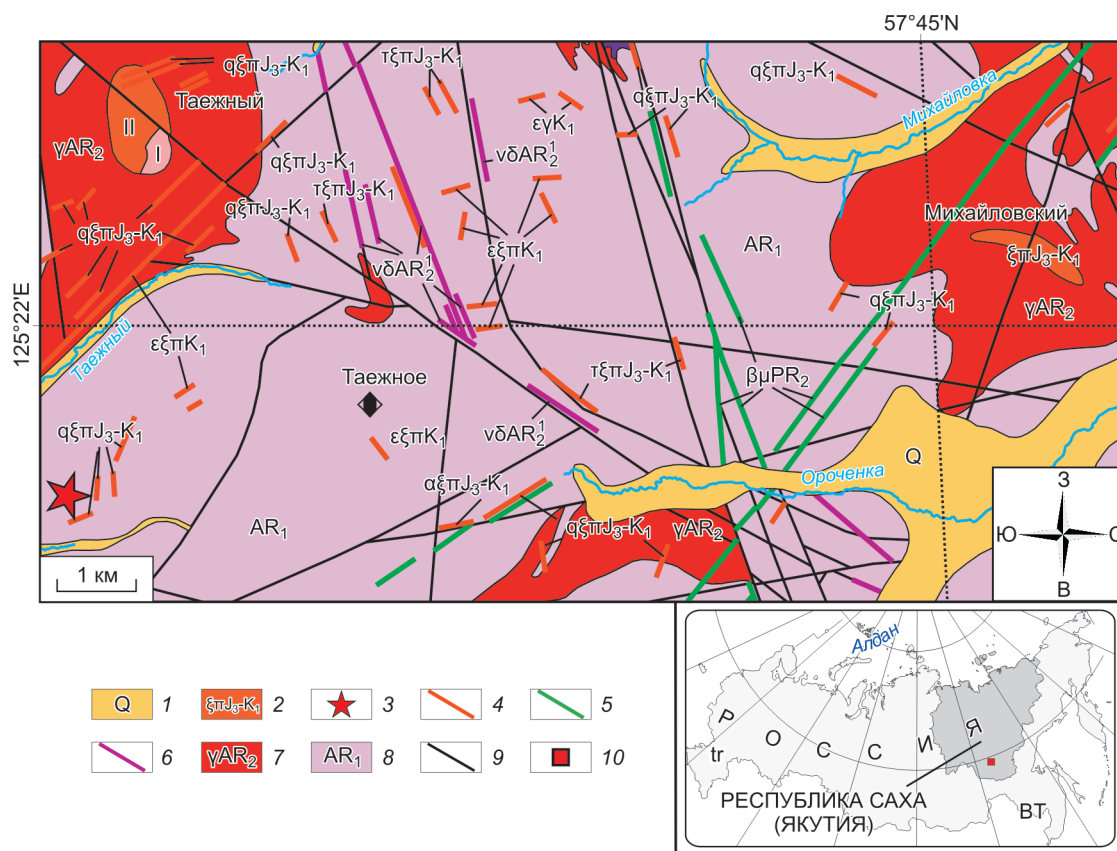


Рис. 1. Геологическая схема исследуемого района (1:200 000) по материалам (Киселева Г.Н., 1988, фондовые материалы) с дополнениями и изменениями авторов.

1 – отложения четвертичного периода; 2 – кварцевые монцитоны, кварцевые сиениты Михайловского и Таежного массивов; 3 – породы силла; дайки: 4 – мезозойских кварцевых сиенитов, амфибол-пироксеновых сиенитов, 5 – протерозойских диабазов, 6 – архейских пироксеновых метагорнблендитов; 7 – позднеархейские граниты и гранитогнейсы, нерасчлененные; 8 – породы докембрийского фундамента; 9 – разломы; 10 – район работ

Fig. 1. Geological diagram of the study area (1:200 000) based on materials (Kiseleva G.N., 1988) with additions and changes by the authors.

1 – deposits of the Quaternary period; 2 – quartz monzonites, quartz syenites of the Mikhailovsky and Taiga massifs; 3 – sill rocks; Dikes: 4 – Mesozoic quartz syenites, amphibole-pyroxene syenites, 5 – Proterozoic diabases, 6 – Archean pyroxene metahornblende dikes; 7 – Late Archean granites and granite-gneisses, undivided; 8 – rocks of the Precambrian basement; 9 – faults; 10 – work area

ных разностей. Для пород массива характерны монцитонитовая, порфировая структура и массивная текстура. Петрографический состав наименее измененных образований (здесь и далее подробный петрографический состав пород рассмотрен в работе [5]), %: ортоклаз (КПШ) – 40, олигоклаз (плаггиоклаз) – 35, роговая обманка (амфибол) – 8, авгит (пироксен) – 2, кварц – 2, акцессорные минералы: апатит, циркон – 1, рудный минерал – 2.

Выходы силла (см. рис. 1) находятся в карьере на востоке от массива Таежный и сложены сильно выветрелыми, светло-серыми кварцевыми сиенитами. По структурным особенностям последний относится к простому наклонному

телу со следующими элементами залегания: южный контакт аз. пад. 240° ∠ пад. 60°, северо-западный контакт аз. пад. 70°, ∠ пад. 40°. Мощность образований силла около 3–5 м, контакты с вмещающими породами согласные, ровные магматического характера. В породах силла отмечаются многочисленные ксенолиты кристаллосланцев разных состава и размера. Для пород характерна порфировая структура и массивная текстура. Минеральный состав наименее измененных пород, %: ортоклаз (КПШ) – 10, олигоклаз (плаггиоклаз) – 40, обыкновенная роговая обманка (амфибол) – 10, кварц – 13, акцессорный апатит – 1, вторичные минералы (серицит, карбонат, хлорит, опатит и т. д.) – 20, рудные минералы – 6.

Тела *даек* кварцевых сиенитов имеют неравномерное и наибольшее распространение на рассматриваемой территории и представлены отдельными развалами и высыпками северо-восточного и северо-западного простирания (см. рис. 1). По большей части это темно-светло-серые, сильно выветрелые разности, характеризующиеся существенно полевошпатовым составом, с типичной порфировой структурой и массивной текстурой, с труднодиагностируемым основным базисом. Дайки по вещественному составу идентичны породам силла из карьера. Состав наименее измененных из них, %: ортоклаз (КПШ) – 15, олигоклаз (плаггиолаз) – 40, обыкновенная роговая обманка (амфибол) – 15, кварц – 12, акцессорный апатит – 1, минералы вторичных изменений (серицит, карбонат, хлорит и т. д.) – 13, рудные минералы – 4.

Геохимический состав магматических пород

Кварцевые монцониты Михайловского массива по высокому содержанию индикаторных элементов (данные по МАЭС+PGS-2) Ba (1300–2500 г/т), Sr (320–690 г/т), а также высоким значениям отношений $K/Rb = 424,24–595,52$ и $Ba/Rb = 21,24–35,16$ близки производным латитовой магмы [6]. Породы имеют отрицательный [7] наклон спектров в распределении РЗЭ, т. е. они обогащены LREE и обеднены HREE (по данным ICP MS см. таблицу, рис. 2). Для пород массива характерна слабая отрицательная Eu-аномалия ($Eu/Eu^* = 0,71$) и низкая сумма $\Sigma PЗЭ$ до 136,45.

Соотношение $Rb/Sr-SiO_2$ [8] в кварцевых монцонитах Михайловского массива типично для магматических пород, формирование которых происходило из материнского магматического очага с участием океанической коры (рис. 3, а). Геодинамическая обстановка, согласно дискриминационным диаграммам [9] (рис. 3, б, в), а также по индексу $ASI < 1,05$ (0,82 ср) отвечает условиям образования вулканических дуг [9]. Соотношение $Zr/Al_2O_3-TiO_2/Al_2O_3$ [10] – образования континентальных и постколлизийных дуг (рис. 3, г).

Отношение $Sr-Rb/Sr$ (рис. 3, д) – близко тренду дифференциации вулканических серий рифтовых зон континентов [11]. На диаграмме геодинамических обстановок формирования магматических пород R_1-R_2 [12] фигуративные точки составов образуют секующее поле от постколлизийного до позднеорогенного этапов развития территории (рис. 3, е). Отношения $K/Rb = 424,24–595,52$, $Ba/Rb = 21,24–35,16$,

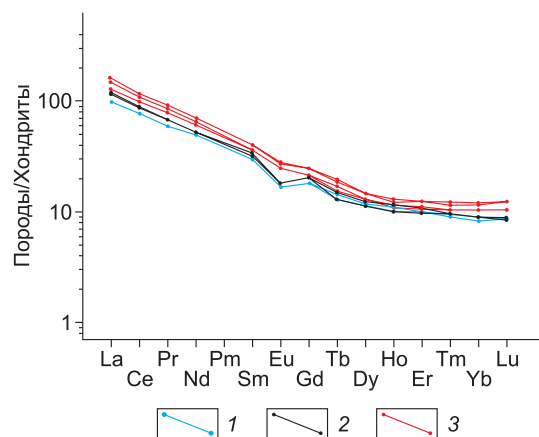


Рис. 2. Распределение REE в магматических породах Эвотинского рудного района, нормирование к хондриту [7]. 1 – кварцевые монцониты Михайловского массива, 2 – кварцевые сиениты силла, 3 – дайки кварцевых сиенитов

Fig. 2. REE distribution in the igneous rocks of the Evotinskiy ore district, normalized to chondrite [7]. 1 – quartz monzonites of the Mikhailovskiy massif, 2 – quartz syenites of the sill, 3 – quartz syenites dikes

$Rb/Sr = 0,08$ и соотношение $Sr-Rb/Sr$ характерны для пород, имеющих источник мантийной природы (см. рис. 3, д) [6, 11]. Высокое отношение $Y/Nb = 2,64–2,77 > 1,2$ для всех рассматриваемых пород (см. таблицу) характерно при наличии источников пород с геохимическими характеристиками базальтов островных дуг и континентальных окраин, со значительным количеством мантийного компонента и коровых меток [13, 14]. Низкие значения отношений $Nb/La = 0,27–0,3$ и Th/U около 4,05 (см. таблицу) указывают на контаминацию магм континентальной корой [15–17]. Для пород Михайловского массива типично наличие слабой отрицательной Eu-аномалии $Eu/Eu^* = 0,71$, что может говорить о формировании первичных мантийных магм при фракционной кристаллизации темноцветных породообразующих минералов [14].

Кварцевые сиениты силла по значительному содержанию Ba (1100–1700 г/т), Sr (270–880 г/т), Zr (200–300 г/т), отношениям $K/Rb = 247,21–488,82$, $Ba/Rb = 9,80–28,19$ отвечают производным латитовой магмы [6]. Монцониты силла характеризуются аналогичным предыдущим породам спектром распределения РЗЭ (см. таблицу), но отличаются повышенной концентрацией LREE и низкой – HREE (см. таблицу, рис. 2). При этом отмечаются слабая отрицательная Eu-аномалия ($Eu/Eu^* = 0,66–0,73$) и более высокое значение суммы $\Sigma PЗЭ$ до 149,58.

**Геохимический состав мезозойских магматических пород
Эвотинского рудного района (по данным ICP MS), г/т**

**Geochemical composition of the Mesozoic igneous rocks
of the Evotinsky ore district (according to ICP MS data), g/t**

Элемент	И20-12/7	И20-17/3	И20-53	И20-54	И20-6	И20-15	И20-22	И20-23/2
	1		2		3			
Rb	76	71	59	72	85	79	89	77
Sr	907	893	931	432	388	1080	717	573
Y	17,9	17,8	18,8	19,8	19,5	20	24	24
Zr	123	124	150	146	171	168	181	175
Nb	6,8	6,4	7,8	7	8,4	8,7	10,4	9,9
Cs	2,9	2,4	1,14	1,09	1,73	2,6	1,68	1,61
Ba	1889	1763	1623	1131	1726,81	1941,72	1858,86	1399,42
La	23	23	27	28	36	31	39	39
Ce	47	47	54	52	68	62	73	73
Pr	5,6	5,7	6,4	6,3	8,3	7,6	8,9	8,9
Nd	23	23	24	24	31	29	33	34
Sm	4,5	4,6	5,2	4,8	5,7	5,6	6,3	6,2
Eu	0,96	0,97	1,02	1,05	1,45	1,47	1,66	1,60
Gd	3,8	3,7	4,2	4,1	4,5	4,5	5,1	5,2
Tb	0,48	0,53	0,48	0,55	0,59	0,65	0,71	0,75
Dy	3	2,9	2,8	3,1	3,3	3,4	3,8	3,8
Ho	0,62	0,57	0,56	0,64	0,63	0,66	0,75	0,70
Er	1,66	1,64	1,58	1,74	1,79	1,87	2,1	2,1
Tm	0,23	0,24	0,24	0,24	0,27	0,27	0,32	0,30
Yb	1,4	1,52	1,5	1,5	1,80	1,84	2,1	2,0
Lu	0,22	0,22	0,22	0,21	0,27	0,27	0,32	0,32
Hf	2,7	2,6	2,9	2,9	3,8	3,9	4,1	3,9
Ta	0,31	0,33	0,32	0,35	0,45	0,48	0,41	0,45
Th	4,8	4,7	4,6	4,4	9,0	6,7	11,2	11,1
U	1,19	1,17	0,96	1,61	2,2	1,49	4,1	3,6
Rb/Sr	0,08	0,08	0,06	0,17	0,22	0,07	0,12	0,13
La/Yb	16,32	15,42	18,14	18,36	20,14	17,12	18,69	19,37
Ce/Yb	33,56	30,69	36,05	34,64	38,02	33,78	34,66	35,84
Nb/La	0,3	0,27	0,29	0,25	0,23	0,28	0,26	0,25
Y/Nb	2,64	2,77	2,4	2,82	2,31	2,32	2,33	2,37
Tn/U	4,05	4,05	4,77	2,72	4,10	4,48	2,75	3,14
Eu/Eu*	0,71	0,71	0,66	0,73	0,88	0,89	0,89	0,86
ΣРЗЭ	135,89	136,45	149,58	148,57	185,33	173,78	202,98	203,25

Примечание. Составы пород: 1 – Михайловского массива, 2 – силла, 3 – тел даек. $Eu/Eu^* = Eu_N/[Sm_N \times Gd_N]^{1/2}$.

Notes. Rock composition: 1 – Mikhailovsky massif, 2 – sill, 3 – dike bodies. $Eu/Eu^* = Eu_N/[Sm_N \times Gd_N]^{1/2}$.

По соотношениям Rb/Sr–SiO₂ [8] породы силла так же, как и образования Михайловского массива, относятся к таковым, сформировавшимся из материнских магматических очагов при участии океанической коры (см. рис. 3, а). Геодина-

мическая позиция по [9, 10] (см. рис. 3, б–г) и значение индекса ASI>1,05 (1,25 ср) близки образованиям, сформировавшимся в условиях океанических и континентальных дуг. Отношение Sr–Rb/Sr [11] отвечает тренду известково-щелоч-

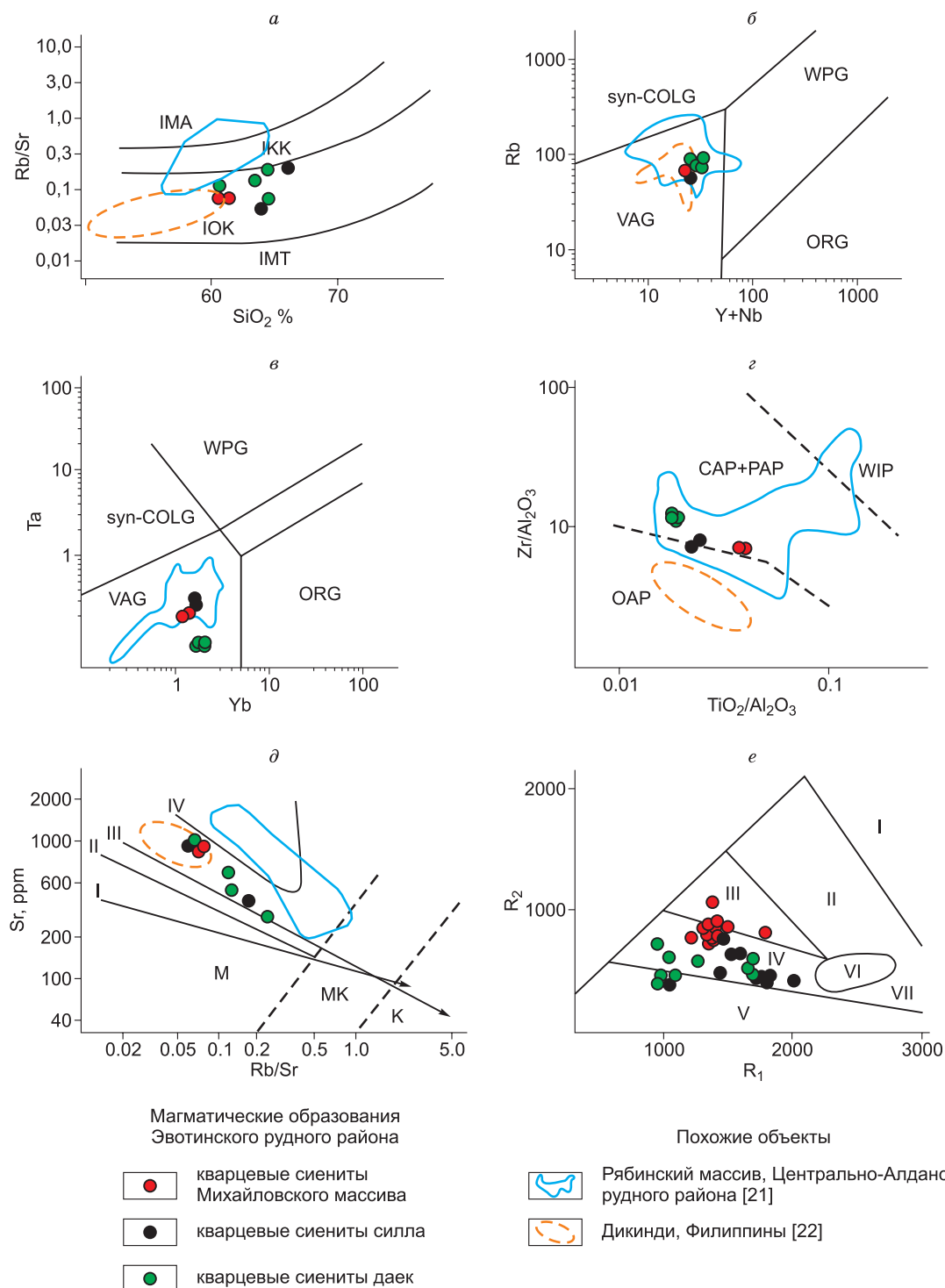


Рис. 3. Дискриминантные диаграммы для магматических образований Эвотинского рудного района
 а – поля диаграммы Rb/Sr–SiO₂ [8], магматические породы: IMT – толетовой серии; ИКК – континентальной коры; ИОК – океанической коры; IMA – щелочно-мантийные; б, в – поля диаграмм Rb–Y+Nb, Ta–Yb [9]: ORG – граниты океанических хребтов; WPG – внутриплитные граниты; VAG – граниты вулканических дуг; syn-COLG – коллизионные граниты; з – диаграмма Zr/Al₂O₃–TiO₂/Al₂O₃ для различных геодинамических обстановок по [10] WIP – внутриплитных пород, CAP+PAP – окраинно-континентальных и постколлизионных вулканических дуг, OAP – океанические дуги; д – соотношение Sr–Rb/Sr в магматических породах. Поля составов магмообразующих источников [11]: М – мантийных, МК – мантийно-коровых, К – коровых. Тренды дифференциации типовых и вулканических серий: I – толетовая островных дуг, II – известково-щелочная, III – известково-щелочная активных континентальных окраин; IV – рифтовых зон континентов;

e – поля диаграммы [12]: I – производных мантийных магм, II – доплитной коллизии, III – постколлизийного воздымания, IV – позднеорогенного, V – орогенного, VI – синколлизийного этапов развития территории, VII – дифференциации щелочных магм. $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$, $R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$

Fig. 3. Discriminant diagrams for the igneous rocks of the Evotinskiy ore district.

a – fields of the Rb/Sr–SiO₂ diagram [9], igneous rocks: IMT – tholeiitic series; IKK – continental crust; IOK – oceanic crust; IMA – alkaline mantle; δ , ϵ – fields of Rb–Y+Nb, Ta–Yb diagrams [9]: ORG – granites of oceanic ridges; WPG – intraplate granites; VAG – volcanic arc granites; syn-COLG – collision granites; z – Zr/Al₂O₃–TiO₂/Al₂O₃ diagram for various geodynamic settings according to [10] WIP – intraplate rocks, CAP+PAP – continental margin and post-collisional volcanic arcs, OAP – oceanic arcs; δ – Sr–Rb/Sr ratio in igneous rocks. Composition fields of magma-forming sources [11]: M – mantle, MK – mantle-crustal, K – crustal. Trends in the differentiation of type and volcanic series: I – tholeiite island arcs, II – calc-alkaline, III – calc-alkaline active continental margins; IV – continental rift zones; e – fields of the diagram [12]: I – derivatives of mantle magmas, II – pre-plate collision, III – post-collisional uplift, IV – late orogenic, V – orogenic, VI – syncollisional stages of development of the territory, VII – differentiation of alkaline magmas. $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$, $R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$

ной серии активных континентальных окраин (см. рис. 3, δ). На диаграмме R_1 – R_2 ([12]) фигуративные точки занимают поле позднеорогенного и анорогенного этапов развития территории (см. рис. 3, e). Отношения $K/Rb = 247,21$ – $488,82$, $Ba/Rb = 9,80$ – $28,19$, $Rb/Sr = 0,07$ – $0,22$ и соотношение Sr – Rb/Sr (см. рис. 3, δ) в кварцевых сиенитах силла указывают на мантийную природу [9, 11]. Высокое отношение $Y/Nb = 2,31$ – $2,37 > 1,2$ (см. таблицу), а также значительное расхождение значений Th/U от 2,72 до 4,77 отражает вклад как коровых, так и мантийных источников [13, 14, 17]. Низкие значения $Nb/La = 0,23$ – $0,28$, так же, как и в породах массива Михайловский, указывают на присутствие корового вещества [15, 16]. Отношение $Eu/Eu^* = 0,88$ – $0,89$ близко хондритовому, что говорит о образовании материнского расплава при фракционной кристаллизации только темноцветных породообразующих минералов [14].

Кварцевые сиениты даек по высокому содержанию Ba (1200–1900 г/т) и Sr (140–720 г/т), по значениям отношений $K/Rb = 384,64$ – $565,14$, $Ba/Rb = 11,41$ – $29,78$ также близки к производным латитовой магмы [6]. Породы даек обогащены LREE и обеднены HREE при несколько повышенных значениях $\Sigma P3Э$ по сравнению с породами массива и силла (см. таблицу, рис. 2), характеризуясь при этом отрицательной Eu -аномалией ($Eu/Eu^* = 0,86$ – $0,89$) и суммой $\Sigma P3Э$ до 203,25.

По соотношениям Rb/Sr – SiO_2 [8] природа возможного источника пород даек аналогично предыдущим образованиям (см. рис. 3, a). Геодинамическая позиция по [9] (см. рис. 3, δ , ϵ) и индексу $ASI < 1,05$ (1,04 ср) определяет их как образования вулканических дуг. Соотношение Zr/Al_2O_3 – TiO_2/Al_2O_3 близко к образованиям континентальных и постколлизийных дуг [10] (см. рис. 3, z). По отношению Sr – Rb/Sr [11] кварцевые сиени-

ты наиболее близки тренду известково-щелочной серии активных континентальных окраин (см. рис. 3, δ). На диаграмме R_1 – R_2 [12] фигуративные точки составов ложатся в поле позднеорогенного с отклонением к анорогенному этапу развития территории (см. рис. 3, e). Отношения $K/Rb = 384,64$ – $565,14$, $Ba/Rb = 11,41$ – $29,79$, $Y/Nb = 2,31$ – $2,37 > 1,2$, $Rb/Sr = 0,07$ – $0,22$, а также соотношение Sr – Rb/Sr (см. рис. 3, δ) в породах даек отвечает породам мантийного генезиса [6, 11]. Расхождение в значениях отношения $Th/U = 2,75$ – $4,48$ указывает как на мантийный, так и на коровый источник [13, 14, 16]. Низкие значения $Nb/La = 0,23$ – $0,28$ в породах (см. таблицу) отражают степень контаминации магм континентальной корой [15, 16]. Отношение $Eu/Eu^* = 0,86$ – $0,89$ характерно для пород, сформировавшихся при фракционной кристаллизации темноцветных породообразующих минералов [18].

Обсуждение

Все рассматриваемые мезозойские магматические образования северо-восточной части Эвотинского рудного района по высоким содержаниям индикаторных элементов Ba и Sr , а также значениям отношений K/Rb и Ba/Rb отвечают таковым латитового ряда. С учетом петрохимического состава, по которым они близки к шошонитовой серии пород [5], можно предположить о принадлежности последних к шошонит-латитовой петрохимической серии. Также все породы района характеризуются плавным отрицательным наклоном в распределении $\Sigma P3Э$, т. е. они обогащены цериевыми и обеднены иттриевыми элементами с ростом значений Eu -аномалии и суммы $\Sigma P3Э$ от пород Михайловского массива $Eu/Eu^* = 0,71$, $\Sigma P3Э$ 136,45_{max} до пород тел даек $Eu/Eu^* = 0,86$ – $0,89$, $\Sigma P3Э$ 203,25_{max}. Это, скорее всего, отражает в последовательность разви-

тия магматизма рассматриваемой территории, т. е. от кварцевых монцонитов массива до внедрения кварцевых сиенитов тел даек.

Полученные в ходе исследований геохимического состава мезозойских магматических пород Эвотинского рудного района данные в целом подтверждают мнение предшественников об участии субдупированной океанической коры Монголо-Охотского бассейна в формировании материнских магматических очагов алданского комплекса мезозойских магматических образований и геохимической близости пород мезозойских магматитов к вулканитам островных дуг [3, 18 и др.]. По соотношениям $Rb/Sr-SiO_2$ все породы отвечают образованиям сформировавшимся из материнского магматического очага океанической коры [8] (см. рис. 3, а), отражается на геохимическом составе пород и накладывает свой отпечаток при определении геодинамической обстановки, по которой последние близки к образованиям вулканических дуг [9, 10] (см. рис. 3, б–д). Хотя по отношению $Sr-Rb/Sr$ – породы Михайловского массива близки тренду дифференциации вулканических серий рифтовых зон континентов [11], что, скорее всего, мало вероятно и в сочетании с петрохимическими параметрами R_1-R_2 [12] отвечает постколлизийному и большей мере позднеорогенному этапам развития территории (см. рис. 3, е).

По тем же параметрам кварцевые сиениты малых тел (силл, дайки) наиболее близки тренду дифференциации известково-щелочных серий пород активных континентальных окраин и согласуются с условиями образования пород в позднеорогенный и анорогенный этапы, что не противоречит сложившимся представлениям большинства исследователей о приуроченности магматизма шошонит-латитовой серии к тыловым частям зон активных континентальных окраин, островных дуг [19] или постколлизийным (постаккреционным) геодинамическим обстановкам [20 и др.]. Схожие выводы сделаны разными авторами для подобных магматических образований Центрально-Алданского рудного района [21], северного Лузона (Филиппины), северного Китая и др. [22], где отмечается аналогичный геодинамический режим и генезис субщелочных и щелочных пород.

По отношениям индикаторных K/Rb , Rb/Sr , Ba/Rb и соотношению $Sr-Rb/Sr$ элементов все магматические породы северо-восточной части

Эвотинского рудного района близки образованиям, имеющим мантийный генезис. Значение отношения $Y/Nb > 1,2$ во всех породах указывает на наличие коровых и мантийных источников. Отрицательная танталовая аномалия $Nb/La < 1$ и высокие значения отношения $Th/U > 2$ во всех рассмотренных породах – явный признак участия корового материала [16, 17]. Напротив, относительное содержание европия $Eu/Eu^* \approx 1$ в породах Михайловского массива и малых телах говорит о мантийной природе последних и о формировании расплавов в ходе фракционной кристаллизации только темноцветных породообразующих минералов [14]. То есть для всех пород характерна двойственность состав.

Выводы

В результате изучения петрографического состава определено, что Михайловский массив сложен кварцевыми монцонитами. Образования силла и даек – кварцевыми сиенитами. Все породы близки к шошонит-латитовой серии пород вулканических дуг.

Последовательность развития магматизма северо-восточной части Эвотинского рудного района представляется в следующем виде: становление пород Михайловского массива и большинства малых тел в постколлизийный с последующим внедрением тел даек кварцевых сиенитов в анорогенный этап развития территории.

Выделенная бимодальность составов мезозойских магматических образований северо-восточной части Эвотинского рудного района, по которой отмечаются метки шошонитовой [5] и латитовой, или скорее всего единой шошонит-латитовой серии пород, может указывать на наличие источника мантийного генезиса. Однако по ряду отношений и соотношений основных петроокислов и P_3E имеет место и коровая составляющая. Как результат имеем смешанный мантийно-коровый источник.

Список литературы / References

1. Билибин Ю.А. Послеюрский вулканизм Алданской плиты. *Геология СССР*. 1947;(18):98–109.
Bilibin Yu.A. Post-Jurassic volcanism of the Aldan plate. *Geology of the USSR*. 1947;18:98–109. (In Russ)
2. Sillitoe R.H. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration. *Mineralium Deposita*. 2002; 37(1):4–13. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0227-6>
3. Кононова В.А., Первов В.А., Богатиков О.А. и др. Мезозойский калиевый магматизм Централь-

- ного Алдана: Геодинамика и генезис. *Геотектоника*. 1995;(3):35–45.
- Kononova V.A., Pervov V.A., Bogatkov O.A., et al. Mesozoic potassium-rich magmatism of Central Aldan: Geodynamics and Genesis. *Geotectonica*. 1995;95(3):35–45. (In Russ).
4. Ivanov A.I., Loskutov E.E., Ivanov M.S., Zhuravlev A.I. Petrography, geochemical features and absolute dating of the Mesozoic igneous rocks of Medvedev and Tazhniy massifs (Southeast Russia, Aldan Shield). *Minerals*. 2022;12(3):1516. <https://doi.org/10.3390/min12121516>
5. Иванов А.И., Иванов М.С., Лоскутов Е.Е. и др. Петрография и петрохимия мезозойских магматических пород северо-восточной части Эвотинского рудного района (Южная Якутия, Алданский щит). *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле»*. *Earth Sciences*. 2022;(4):25–42. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.28.4.003>
- Ivanov A.I., Ivanov M.S., Loskutov E.E., et al. Petrography and petrochemistry of Mesozoic igneous rocks in the northeastern part of the Evota ore region (South Yakutia, Aldan Shield). *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*. 2022;(4):25–42. (In Russ). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.28.4.003>
6. Таусон Л.В., Гундобин Г.М., Зорина Л.Д. *Геохимические поля рудно-магматических систем*. Новосибирск: Наука; 1987. 202 с.
- Tauson L.V., Gundobin G.M., Zorina L.D. *Geochemical fields of ore-magmatic systems*. Novosibirsk: Nauka; 1987. P. 202 (In Russ).
7. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Geological Society Special Publications. Volume 42*. London: Geological Society of London; 1989: 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
8. Tischendorf G., Palchen W. Zur Klassifikation von Granitoiden. *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften*. 1985;13:615–627.
9. Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the Tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*. 1984;25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
10. Müller D., Rock N.M.S., Groves D.I. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different Tectonic settings: a pilot study. *Mineralogy and Petrology*. 1992;46:259–289. <https://doi.org/10.1007/BF01173568>
11. Даценко В.М. Петрогеохимическая типизация гранитоидов юго-западного обрамления Сибирской платформы. В кн.: *Петрография на рубеже XXI века: итоги и перспективы. Материалы Второго Всероссийского петрографического совещания, Т. III*. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УРО РАН; 2000: 270–274.
- Datsenko V.M. Petrogeochemical typification of granitoids of the southwestern framing of the Siberian Platform. In: *Petrography at the turn of the 21st century: results and prospects. Vol. III*. Syktyvkar: Institute of Geology of the Komi Scientific Center URO RAS; 2000: 270–274. (In Russ)
12. Batchelor R.A., Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*. 1985;48:43–55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)
13. Eby G.N. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*. 1990;26(1-2):115–134. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(90\)90043-Z](https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90043-Z)
14. Балашов Ю.А. *Геохимия редкоземельных элементов*. М.: Наука; 1976. 267 с.
- Balashov Yu.A. *Geochemistry of rare earth elements*. Moscow: Nauka; 1976. 267 p. (In Russ)
15. Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Herget J., et al. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotopic evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1993;114:171–188. <https://doi.org/10.1007/BF00307754>
16. Rudnick R.L., Gao S. 3.01 – Composition of the continental crust. In: Holland H.D., Turekian K.K. (eds). *Treatise on geochemistry*. 2003, pp. 1–64. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>
17. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. *Континентальная кора, ее состав и эволюция*. М.: Мир; 1988. 380 с.
- Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Moscow: Mir; 1988. 380 p. (In Russ)
18. Кочетков А.Я., Лазебник К.А. Щелочные ультрабазиты и базиты Якутского массива (Центральный Алдан). В кн.: Ковальский В.В. (ред.) *Геохимия и минералогия базальтов и ультрабазитов Сибирской платформы: Сб. науч. тр.* Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1984. С. 62–82.
- Kochetkov A.Y., Lazebnik K.A. Alkaline ultrabasic and basic rocks of Yakut massif (Central Aldan). In: Kovalskiy V.V. (ed.). *Geochemistry and mineralogy of basalts and ultrabasites of Siberian Platform*. Yakutsk; 1984, pp. 62–82. (In Russ.)
19. Stern R.J. Subduction zones. *Review of Geophysics*. 2002;40(4):3–1–3–38. <https://doi.org/10.1029/2001RG000108>
20. Dugen S., Hoernle K., Van Den Bogaard P., Garbe-Schonberg D. Post-collisional transition from subduction to intraplate-type magmatism in the westernmost Mediterranean: evidence for continental-edge delamination of subcontinental lithosphere. *Journal of Petrology*. 2005;46(6):1155–1201. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi013>
21. Шатова Н.В. *Рудоносность гидротермально-метасоматических образований Рябиного рудного поля (Южная Якутия): Дис. ... канд. геол.-мин. наук*. СПб.; 2016. 181 с.
- Shatova N.V. *Ore content of hydrothermal-metasomatic formations of the Ryabin ore field (Southern*

Yakutia): Diss. ... Cand. Sci., St. Petersburg; 2016. 181 p. (In Russ.)

22. Wolfe R.C., Cooke D.R. Geology of the Didipio region and genesis of the Dikindi alkalic porphyry Cu-

Au deposit and related pegmatites, Northern Luzon, Philippines. *Economic Geology*. 2011;106(8):1279–1315. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.8.1279>

Об авторах

ИВАНОВ Алексей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, ResearcherID: JBR-7954-2023, Scopus AuthorID: 57674640500, РИНЦ AuthorID: 176449, e-mail: aiivanov@diamond.ysn.ru

ИВАНОВ Мичил Спартакович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus AuthorID: 57212410522, РИНЦ AuthorID: 1050170 e-mail: ivanov.michil@bk.ru

ЛОСКУТОВ Евгений Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus AuthorID: 57205150102, РИНЦ AuthorID: 729281, e-mail: Loskutov@diamond.ysn.ru

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus AuthorID: 57200217371, РИНЦ AuthorID: 857832, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

ТИМОФЕЕВ Владимир Федорович, инженер 1 категории, <https://orcid.org/0009-0001-5429-9605>, ResearcherID: JMQ-9137-2023, Scopus Author ID: 20735659600, РИНЦ AuthorID 64755, e-mail: vf_timofeev@mail.ru

About the authors

IVANOV Alexey Ivanovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, ResearcherID: JBR-7954-2023, Scopus Author ID: 57674640500, RISC AuthorID: 176449, e-mail: aiivanov@diamond.ysn.ru

IVANOV Michil Spartakovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus AuthorID: 57212410522, RISC AuthorID: 1050170, e-mail: ivanov.michil@bk.ru

LOSKUTOV Evgeniy Evgenievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus AuthorID: 57205150102, RISC AuthorID: 729281, e-mail: Loskutov@diamond.ysn.ru

ZHURAVLEV Anatolii Ivanovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus Author ID: 57200217371, RISC AuthorID: 857832, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

TIMOFEEV Vladimir Vedorovich, Engineer, <https://orcid.org/0009-0001-5429-9605>, ResearcherID: JMQ-9137-2023, Scopus Author ID: 20735659600, RISC AuthorID: 64755, e-mail: vf_timofeev@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 18.10.2023

Поступила после рецензирования / Revised 12.11.2023

Принята к публикации / Accepted 23.11.2023