

УДК: 552.11+549.08(470.5)

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-212-223

Геологическое строение и петрология Нижне-Синячихинского гранитоидного массива (Алапаевско-Сухоложская медно-порфировая зона, Средний Урал)

С. В. Прибавкин, А. В. Коровко, И. А. Готтман

Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mail: pribavkin@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 25.04.2019 г., принята к печати 22.05.2019 г.

Объект исследования. Изучено геологическое строение и состав пород Нижне-Синячихинского плагиогранитного массива, входящего в состав перспективной на Cu(Au,Mo)-порфировый тип минерализации Алапаевско-Сухоложской зоны. Задачей исследования являлось определение особенностей формирования пород массива и их сравнение с близкими по возрасту продуктивными гранитоидами порфировых месторождений Урала. **Методы.** Определение состава минералов выполнено на ЭДС приставке INCA Energy 450 X-Max 80 и электронном микрозонде CAMECA SX-100. Состав пород получен рентгеноспектральным флуоресцентным методом на CPM-35 и XRF 1800 с измерением FeO методом мокрой химии. Концентрации редких и редкоземельных элементов определены на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ELAN 9000 в Центре коллективного пользования УрО РАН "Геоаналитик". **Результаты.** В строении массива впервые выделена ранняя тоналит-плагиогранитная серия, представленная тоналитами гипабиссального облика, прорванными дайками плагиогранит-порфиров. Показано, что отделение расплавов плагиогранит-порфиров от магм более основного состава произошло в основании островодужной постройки, а их кристаллизация осуществлялась в ее верхней части при давлении 1.8–2.3 кбар. В противоположность им плагиограниты главной фазы массива были отделены от родоначального расплава в промежуточной камере, расположенной на уровне верхней коры, с последующей кристаллизацией при давлении 1.5–2.0 кбар. **Заключение.** Сопоставление плагиогранитов главной фазы и выделенных плагиогранит-порфиров ранней серии указывает на их сходный состав, а также их подобие близким по возрасту гранитоидам Южного Урала, продуктивным на порфировый тип оруденения. Исследование концентраций F, Cl, S в апатитах и амфиболах пород массива – довод в пользу их принадлежности к андезитовидным формациям, продуктивным на Cu(Au)-порфировый тип минерализации. Отсутствие сульфидной минерализации этого типа может быть объяснено более значительной глубиной формирования пород и их эрозионного среза.

Ключевые слова: Алапаевско-Сухоложская зона, Нижне-Синячихинский массив, петрология, гранитоиды, апатит, медно-порфировые месторождения

Благодарность

Работа выполнена в рамках темы № АААА-А18-118052590034-0 государственного задания ИГГ УрО РАН.

Geological structure and petrology of the Nizhne-Sinyachikhinsky granitoid massif (Alapayevsk-Sukhoi Log porphyry copper zone, the Middle Urals)

Sergei V. Pribavkin, Anatoly V. Korovko, Irina A. Gottman

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st.,
Ekaterinburg 620016, Russia, e-mail: pribavkin@igg.uran.ru

Received 25.04.2019, accepted 22.05.2019

Research subject. The geological structure and rock composition of the Nizhne-Sinyachikhinsky plagiogranite massif, which is part of the Alapayevsk-Sukholozhsky zone, is promising for the Cu(Au,Mo)-porphyritic mineralization type, were studied. The aim was to determine the formation features of these rocks and compare them with the productive granitoids of Ural porphyry deposits of similar age. **Materials and methods.** The mineral composition of the rocks was determined using

Для цитирования: Прибавкин С.В., Коровко А.В., Готтман И.А. (2020) Геологическое строение и петрология Нижне-Синячихинского гранитоидного массива (Алапаевско-Сухоложская медно-порфировая зона, Средний Урал). *Литосфера*, 20(2), 212–223. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-212-223

For citation: Pribavkin S.V., Korovko A.V., Gottman I.A. (2020) Geological structure and petrology of the Nizhne-Sinyachikhinsky granitoid massif (Alapayevsk-Sukhoi Log porphyry copper zone, the Middle Urals). *Litosfera*, 20(2), 212–223. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-212-223

a JEOL JSM 6790LV scanning electron microscope with an INCA Energy 450 X-Max 80 EDS spectrometer and a CAM-ECA SX-100 electron microprobe analyser. The rock composition was obtained by X-ray fluorescence spectrometry on a SRM-35 and XRF-1800 spectrometers with the titrimetric determination of FeO. The concentrations of rare and rare-earth elements were determined on an ELAN 9000 inductively coupled plasma mass spectrometer at the Geoanalitik Center for Collective Use of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. **Results.** For the first time, an early tonalite-plagiogranite series was identified in the structure of the massif. This series is represented by tonalites of the hypabyssal appearance, broken through by the dikes of plagiogranite-porphyry. It was shown that the separation of plagiogranite-porphyry melts from magmas of the mafic composition occurred at the base of the island-arc construction, and their crystallisation was carried out in an intermediate chamber at a pressure of 1.8–2.3 kbar. In contrast, the plagiogranites of the main phase of the massif were separated from the parent melt in an intermediate chamber located at the level of the upper crust, and their crystallisation occurred at a pressure of 1.5–2.0 kbar. **Conclusions.** A comparison of the main phase plagiogranites and the isolated early-series plagiogranite-porphyry indicates their similar composition, as well as their similarity in age with the granitoids of the Southern Urals, productive in terms of the porphyry mineralisation type. The concentrations of F, Cl and S in the apatites and amphiboles of the rocks under study is an argument in favour of their belonging to andesitoid formations that are productive in terms of the Cu (Au)-porphyry mineralisation type. The absence of the sulphide mineralisation of this type can be explained by a more significant depth of rock formation and their erosion section.

Keywords: *Alapayevsk-Sukhoi Log zone, Nizhne-Sinyachikhinsky massif, petrology, granitoids, apatite, porphyry copper deposits*

Acknowledgments

This work was carried out within the framework of the topic No. AAAA-A18-118052590034-0 of the IGG UB RAS state assignment.

ВВЕДЕНИЕ

Алапаевско-Сухоложская зона является одним из перспективных районов поисковых работ на обнаружение промышленных месторождений медно-порфирового типа (Федорова и др., 1971; Коротеев и др., 1979; Бочкарев, Сурин, 1993; Коровко и др., 2004; Грабежев и др., 2015; Plotinskaya et al., 2017; и др.). В пределах этой субмеридиональной зоны протяженностью около 100 км и шириной 3–10 км, входящей в состав Восточно-Уральской мегазоны, ранее выявлены многочисленные медно-порфировые рудопроявления, приуроченные к вулканическим, вулканокластическим породам, в том числе небольшим мезо- и гипабиссальным массивам девонского возраста преимущественно андезитового состава. Последние сложены габбро-диоритами, диоритами, тоналитами, плагиогранитами, трондjemитами натриевой серии в северной алапаевской части зоны (Нижне-Синячихинский, Ямовский, Ялуниногорский, Исаковский и др. массивы) и кварцевыми диоритами, гранодиоритами, гранитами калиево-натриевой серии в ее южной сухоложской части (Артемовский, Верхне-Артемовский, Алтыннайский и др. массивы).

Ранее нами был исследован минеральный и химический состав пород Ялуниногорского габбро-диорит-плагиогранитного массива, PT - fO_2 - xH_2O условия их кристаллизации, уровень эрозионного среза, дана оценка перспектив обнаружения порфирового оруденения (Прибавкин и др., 2018). В этой работе с использованием аналогичных подходов рассматривается Нижне-Синячихинский плагиогранитный массив – самый северный массив открытой части Алапаевско-Сухоложской зоны.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МАССИВА

Нижне-Синячихинский массив расположен к востоку от пос. Ниж. Синячиха (рис. 1) в 11 км к северу от г. Алапаевск. Как показала геологическая съемка (Кузовков и др., 1992), массив представляет собой вытянутое в ССЗ направлении тело неправильной формы размером 6.5×1.2 км, осложненное многочисленными тектоническими нарушениями и распространяющееся, по геофизическим данным, на глубину до 1 км. Западный контакт массива интрузивный, слабо извилистый, субвертикальный с нечетким падением на запад. Восточный контакт почти прямолинейный, тектонический, субвертикальный. В составе массива преимущественное развитие имеют средне-крупнозернистые плагиограниты, местами порфировидные, в которых отмечаются небольшие участки (5–50 м) развития ксенолитов среднезернистых кварцевых диоритов и тоналитов (близ устья р. Синячиха). Жильные породы развиты весьма ограниченно и представлены плагиогранит-порфирами. Вмещающие породы рудянской базальт-андезит-риодацитовый толщи D_{1-2} приконтактово изменены вплоть до образования амфиболовых, эпидот-амфиболовых и кварц-эпидот-амфиболовых роговиков (Казаков и др., 2016). Породы массива претерпели гидротермально-метасоматические изменения по зонам катаклаза с неравномерным развитием альбита, хлорита, эпидота, кварца, карбоната.

Наши наблюдения в естественных обнажениях вдоль р. Синячиха (см. рис. 1) показывают более сложное строение массива. Кроме преобладающих крупнозернистых плагиогранитов (т.н. 562, 566), относящихся, согласно (Кузовков и др., 1992), к третьей фазе ялуниногорского габбро-диорит-

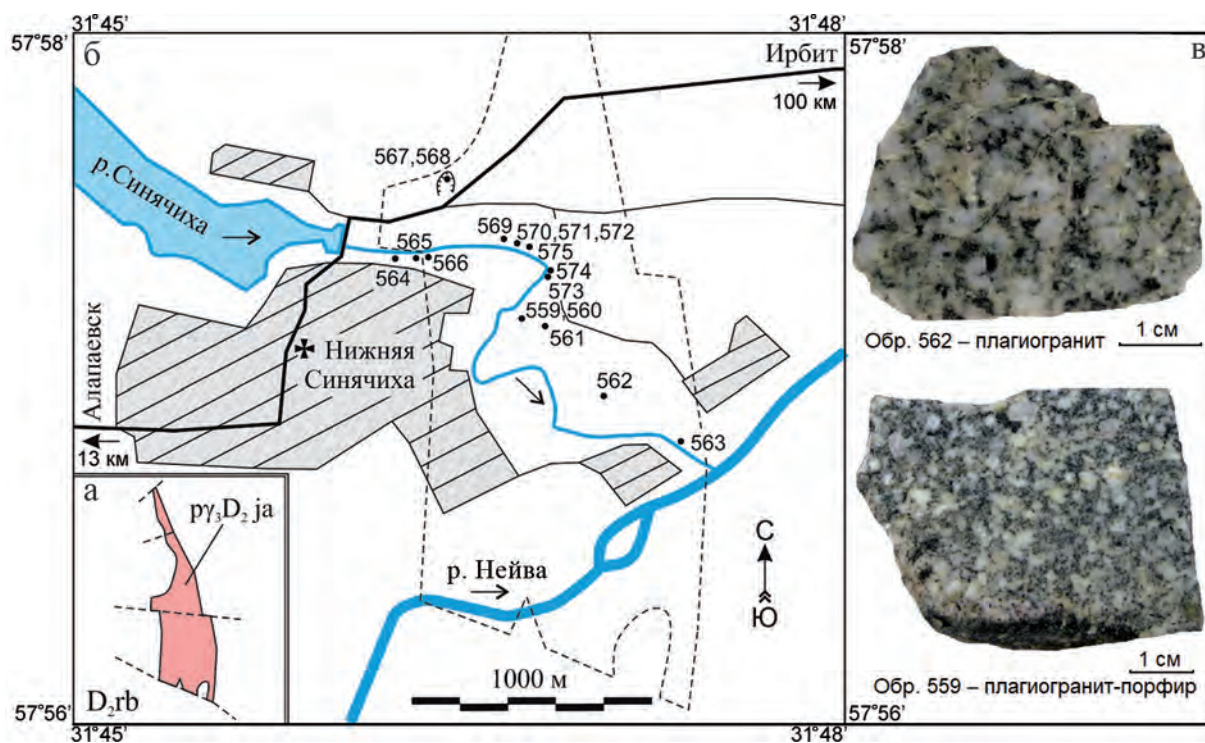


Рис. 1. Геологическая схема Нижне-Синячихинского массива (а), карта фактов (б), фотографии образцов (в). Контур массива показан по данным (Кузовков и др., 1992).

D_{2rb} – рудянская риодацит-базальтовая толща с субвулканическими экструзиями, дайками дацитов, диабазов; py_3D_2ja – третья фаза ялуниногорского комплекса: плагиограниты, плагиогранит-порфиры. Точками показаны места отбора проб, номера которых отвечают образцам. Пунктиром обозначен контур массива.

Fig. 1. Geological scheme of the Nizhne-Sinyachikha massif (a), fact map (б), photographs of samples (в). The massif contour is shown according to (Kuzovkov et al., 1992).

D_{2rb} – Rudyanskaya rhyodacite-basalt stratum with subvolcanic extrusions, dacite dykes, diabases; py_3D_2ja – the third phase of the Yalunogorsk complex: plagiogranite, plagiogranite-porphyr. The dots indicate sampling locations whose numbers correspond to the samples. The dotted line shows the outline of the massif.

плагиогранитного комплекса или ко второй фазе алтынайского диорит-плагиогранитного комплекса (Казаков и др., 2016), в массиве выявлены тоналиты гипабиссального облика, насыщенные дайками плагиогранит-порфиров. Последние объединены в тоналит-плагиогранитную серию, породы которой (т.н. 559, 560, 567–575, см. рис. 1) предшествовали становлению плагиогранитов главной фазы массива. Возможно, что тоналиты и плагиограниты этой серии могут иметь генетическую связь с субвулканическими риодацитами рудянской толщи, примыкающими к массиву с северо-запада.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Исследование состава пород и минералов выполнено в Центре коллективного пользования “Геоаналитик” ИГТ УрО РАН. Химический анализ минералов получен на ЭДС-приставке INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы “Oxford Instruments” при ускоряющем напряжении 20 кВ, время реги-

страции импульсов 30 с. Были использованы сертифицированные стандартные образцы: диопсид, жадеит, ортоклаз, рутил, родонит, Cr_2O_3 , Fe_2O_3 . Полученные результаты измерений состава нормализованы к 100%. Предел обнаружения большинства элементов в оксидной форме составляет 0.2 мас. %. Определение концентраций F, Cl, S в апатите и амфиболе выполнено на рентгеновском микроанализаторе SX-100 фирмы CAMECA при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронного зонда 10 нА. В качестве эталонов были использованы аттестованные образцы апатита, хлорапатита, FeS_2 . Пределы обнаружения по фтору – 0.2, хлору и сере – 0.03 мас. %.

Микрофотографии в обратно-рассеянных электронах получены на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы “Jeol”. Химический состав пород изучен рентгеноспектральным флуоресцентным методом на CPM-35 и XRF 1800. Количество FeO и потери при прокаливании установлены методом мокрой химии. Редкие и редкозе-

мельные элементы в породах определены на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ELAN 9000.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

Преобладающие в массиве плагиограниты габбро-тоналит-плагиогранитного комплекса обладают полнокристаллической крупнозернистой гранитной структурой (см. рис. 1в, 2а). В отдельных случаях более крупные относительно полевого шпата выделения кварца (до 10 мм) придают им

порфировидный облик. Содержание последних составляет 40%, феррических минералов – не более 5–10%. Преобразования плагиогранитов связаны с их катаклизмом и зеленокаменными изменениями, в результате которых плагиоклаз полностью замещается альбитом, а амфибол, магнетит и биотит – хлоритом совместно с эпидотом, пумпеллитом, магнетитом.

Среди других разновидностей пород комплекса нами встречены кварцсодержащее габбро (обр. 563) и плагиоаплит (обр. 561). Габбро состоит в плагиогранитах крупный ксенолит размером более 10 м. Оно сильно преобразовано, но сохраняет пер-

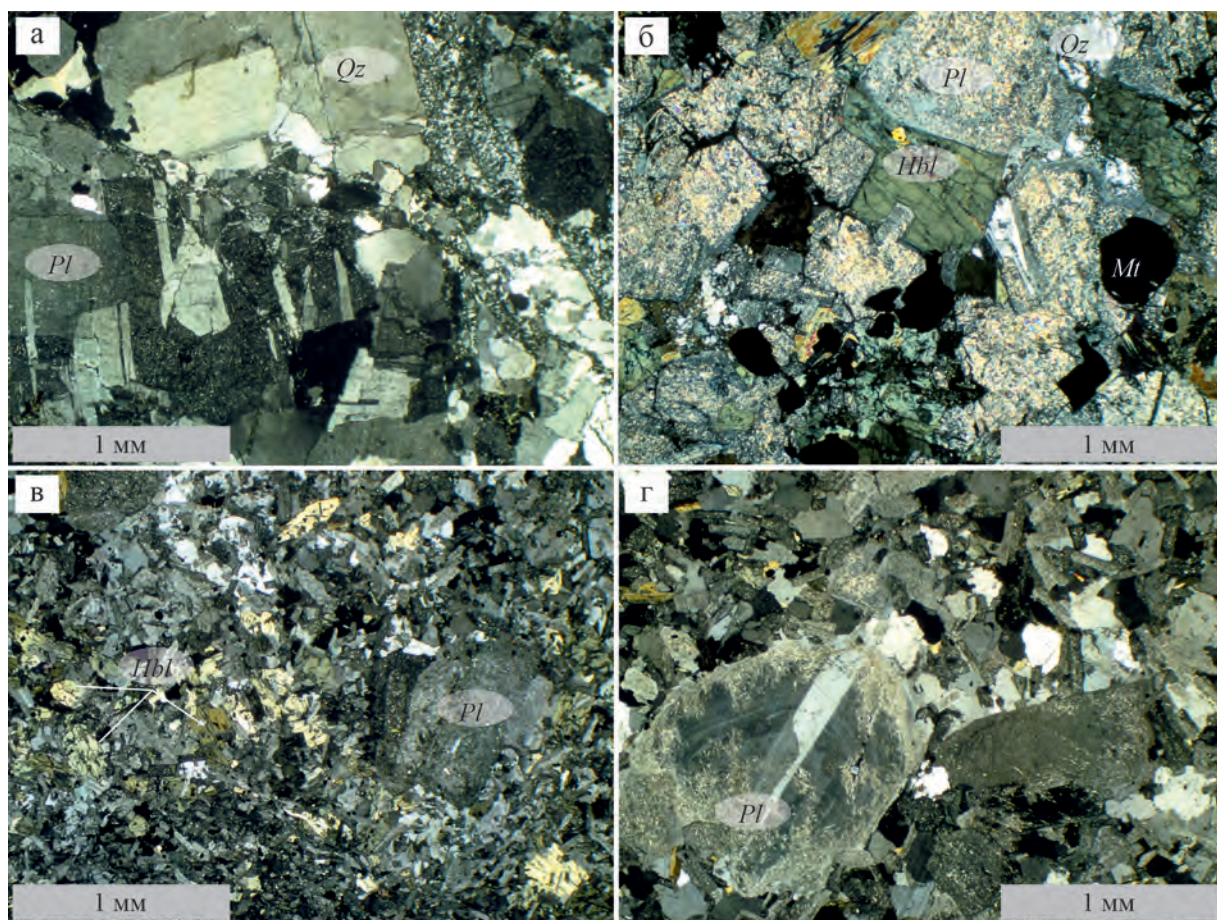


Рис. 2. Структуры пород Нижне-Синячихинского массива (николи скрещены).

а – крупнозернистый, катаклазированный плагиогранит (обр. 562); б – кварцсодержащее габбро, сложенное субидiomорфными зернами плагиоклаза, титаномagnetита с интерстициальным амфиболом и кварцем (обр. 563); в – тоналит призматически-зернистой структуры (обр. 574), содержащий редкие порфировые включения зонального андезита (ан. 5, табл. 1); кварцевые микропайкилокристы базиса содержат идиоморфные зерна олигоклаза и амфибола; г – плагиогранит-порфир, содержащий порфировые включения зонального андезита (обр. 559, ан. 13-15, табл. 1). Qz – кварц, Pl – плагиоклаз, Hbl – роговая обманка, Mt – магнетит.

Fig. 2. Structures of rocks of the Nizhne-Sinyachikha massif.

а – coarse-grained, cataclastic plagiogranite (sample 562); б – quartziferous gabbro composed of subidiomorphic grains of plagioclase, titanomagnetite with interstitial amphibole and quartz (sample 563); в – tonalite of prismatic-granular structure (sample 574), containing rare porphyritic phenocrysts of zonal andesine (an. 5, Table 1); the quartz microblocks of the base contain idiomorphic grains of oligoclase and amphibole; г – plagiogranite porphyry containing porphyry phenocrysts of zonal andesine (sample 559, an. 13–15, Table 1). Qz – quartz, Pl – plagioclase, Hbl – hornblende, Mt – magnetite.

вичную среднезернистую субофитовую структуру с пегматоидными обособлениями амфибол-кварц-полевошпатового состава (рис. 2б). Слагающие его минералы представлены низкоглиноземистой роговой обманкой, хлоритом, эпидотом, альбитом, кварцем. Плаггиоаплит имеет мелкозернистую структуру, а в его составе преобладают альбит, кварц, в небольших количествах присутствуют амфибол и магнетит.

Породы тоналит-плаггиогранитной серии представлены редкопорфировыми тоналитами, обладающими мелкозернистой, призматически-зернистой, панидиоморфнозернистой, иногда метельчатой структурой (рис. 2в). Они состоят из идиоморфных кристаллов плагиоклаза An_{12-20} (65–75%) и амфибола, представленного магнезиальной роговой обманкой (10–20%) с железистостью 0.44–0.40, сцементированных кварцем. В небольшом количестве в них присутствует низкотитанистый магнетит.

Плаггиогранит-порфиры, секущие тоналиты, имеют выраженный порфировый облик (см. рис. 1в, 2г), обусловленный многочисленными (до 40%) вкрапленниками зонального плагиоклаза An_{38-48} и редкими округлыми зернами кварца. Преобладают вкрапленники размером 2–5 мм, редко больше. В микрозернистом базисе порфиров, иногда име-

ющем микропойкилитовую структуру, заключены идиоморфные зерна кислого плагиоклаза An_{11-20} (15–25%), магнезиальной роговой обманки железистостью 0.43–0.38 и низкотитанистого магнетита. Общее содержание в породах кварца варьирует от 25 до 35%. На удалении от контактов порфировая структура пород становится менее выраженной, приближаясь к гранитной. Химический состав минералов тоналитов и плаггиогранит-порфиров близок (табл. 1), что может указывать на сходство составов и условий кристаллизации пород серии.

Постмагматические изменения пород массива широко распространены. Наиболее высокотемпературные изменения, отвечающие условиям магнетитсодержащей феррофации (Ферштатер, 1987), привели к замещению первично магматического амфибола магнезиальной роговой обманкой и появлению небольшого количества магнетита. Дальнейшие преобразования пород вызвали замещение амфибола эпидотом, хлоритом, иногда совместно с магнетитом, альбитизацию полевых шпатов. Отметим отсутствие сульфидов, указывающее на низкую активность серы на этапе их преобразования. Между тем нами отмечено наличие редких кварц-карбонатных прожилков, несущих пирит-халькопиритовую минерализацию, состав и строе-

Таблица 1. Состав амфибола (*Hbl*), плагиоклаза (*Pl*), магнетита (*Mt*) из тоналита и плаггиогранит-порфира

Table 1. Composition of amphibole (*Hbl*), plagioclase (*Pl*), magnetite (*Mt*) from tonalite and plagiogranite porphyry

№ п.п.	Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	V ₂ O ₅	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Сумма	f/An
Тоналит, обр. 574														
1	<i>Hbl</i>	48.96	1.32	6.44	16.14	–	0.51	13.51	11.2	1.50	0.27	0.17	99.84	0.40
2	<i>Hbl</i>	48.92	1.41	6.21	17.36	–	0.60	12.69	11.07	1.41	0.20	0.14	99.87	0.43
3	<i>Hbl</i>	49.08	1.17	5.65	17.91	–	0.86	12.47	10.91	1.32	0.48	0.15	99.86	0.44
4	<i>Hbl</i>	51.12	0.73	4.36	17.53	–	0.68	13.24	10.83	0.97	0.28	0.29	99.73	0.42
5	<i>Pl</i>	57.90	–	26.76	0.33	–	–	–	8.87	6.13	–	–	100.0	0.44
6	<i>Pl</i>	63.82	–	22.85	–	–	–	–	3.53	9.04	0.76	–	100.0	0.17
7	<i>Pl</i>	65.11	–	22.28	–	–	–	–	2.49	9.88	0.25	–	100.0	0.12
8	<i>Mt</i>	0.65	3.11	0.89	94.69	0.66	–	–	–	–	–	–	100.0	–
9	<i>Mt</i>	0.86	1.24	–	96.96	0.94	–	–	–	–	–	–	100.0	–
Плаггиогранит-порфир, обр. 559														
10	<i>Hbl</i>	48.47	1.54	6.79	16.49	–	0.50	13.24	10.92	1.59	0.33	0.14	99.86	0.41
11	<i>Hbl</i>	48.4	1.50	6.80	16.08	–	0.48	13.53	11.19	1.59	0.25	0.19	99.82	0.40
12	<i>Hbl</i>	49.7	1.33	5.59	15.59	–	0.00	14.08	11.46	1.30	0.65	0.31	99.71	0.38
13	<i>Hbl</i>	50.35	1.19	5.12	15.77	–	0.38	13.96	11.53	1.05	0.42	0.24	99.78	0.38
14	<i>Pl</i>	56.14	–	27.66	0.42	–	–	–	9.83	5.75	0.20	–	100.0	0.48
15	<i>Pl</i>	57.69	–	26.87	0.32	–	–	–	8.90	6.22	0.00	–	100.0	0.44
16	<i>Pl</i>	58.86	–	26.14	–	–	–	–	7.79	6.82	0.39	–	100.0	0.38
17	<i>Pl</i>	63.43	–	23.02	–	–	–	–	4.21	8.95	0.39	–	100.0	0.20
18	<i>Pl</i>	64.99	–	21.58	–	–	–	–	2.64	10.79	0.00	–	100.0	0.12
19	<i>Mt</i>	0.75	0.43	0.55	97.38	0.89	–	–	–	–	–	–	100.0	–
20	<i>Mt</i>	0.95	2.53	1.02	94.68	0.81	–	–	–	–	–	–	100.0	–
21	<i>Mt</i>	0.55	1.34	0.62	96.67	0.82	–	–	–	–	–	–	100.0	–

Примечание. f/An – железистость роговой обманки или доля анортитового компонента в плагиоклазе. Содержание фтора в амфиболе, по данным микрозонда, варьирует в диапазоне 0.14–0.50 мас. %.

Note. f/An – the value of the iron index of hornblende or the share of the anorthite component in the plagioclase. According to the microprobe data, the fluorine content in amphibole varies in the range of 0.14–0.50 wt %.

ние которых подобны ранее описанным в Ялуниногорском массиве (Прибавкин и др., 2018).

ГАЛОГЕНЫ И СЕРА В АПАТИТЕ И АМФИБОЛЕ

Распределение и концентрация галогенов в апатите, амфиболе, биотите могут выступать в качестве одного из критериев продуктивности гранитоидов на тот или иной тип магматогенного оруденения, определять его тип, состав и масштабы (Холоднов, Бушляков, 2002). В этой связи нами исследованы содержания F, Cl, S в апатите и амфиболе пород массива и проведено их сопоставление с другими уральскими рудоносными магматическими комплексами близкого возраста и состава, специализированными на порфировый и скарново-магнетитовый типы оруденения.

Сопоставление апатитов пород массива показывает достаточно явное различие между ранней тоналит-плагиогранитной серией и плагиогранитами главной фазы по содержанию хлора (табл. 2, рис. 3), что доказывает правомерность выделе-

ния породных серий по условиям кристаллизации и, возможно, магмогенерации. Сходство составов апатита с андезитоидными сериями, специализированными на Cu-порфировый тип оруденения, выражено для тоналитов и плагиогранит-порфиров в большей мере, чем для плагиогранитов. Это сход-

Таблица 2. Состав галогенов и серы в апатите, мас. %

Table 2. The composition of halogens and sulfur in apatite, wt %

№ ан.	F	SD	Cl	SD	S	SD
Тоналит, обр. 574						
1	2.80	0.33	0.48	0.07	0.00	—
2	2.82	0.33	0.46	0.06	0.00	—
3	2.84	0.33	0.46	0.07	0.00	—
4	2.91	0.33	0.51	0.07	0.00	—
5	2.95	0.33	0.58	0.07	0.00	—
6	2.99	0.33	0.44	0.06	0.00	—
7	2.99	0.33	0.51	0.07	0.00	—
8	3.31	0.34	0.30	0.05	0.00	—
9	3.37	0.35	0.25	0.05	0.04	0.03
10	3.40	0.34	0.28	0.05	0.00	—
Плагиогранит-порфир, обр. 559						
1	3.16	0.33	0.41	0.06	0.00	—
2	3.42	0.34	0.55	0.07	0.00	—
3	3.67	0.36	0.29	0.05	0.00	—
4	3.90	0.35	0.36	0.06	0.00	—
Плагиогранит, обр. 562						
1	3.25	0.34	0.07	0.03	0.00	—
2	3.25	0.35	0.11	0.04	0.00	—
3	3.40	0.35	0.00	—	0.00	—
4	3.41	0.35	0.00	—	0.00	—
5	3.42	0.34	0.06	0.03	0.00	—
6	3.51	0.36	0.07	0.03	0.00	—
7	3.52	0.35	0.00	—	0.00	—
8	3.52	0.35	0.00	—	0.00	—
9	3.67	0.37	0.06	0.03	0.00	—
10	3.73	0.36	0.06	0.03	0.00	—

Примечание. SD – стандартное отклонение.

Note. SD is the standard deviation.

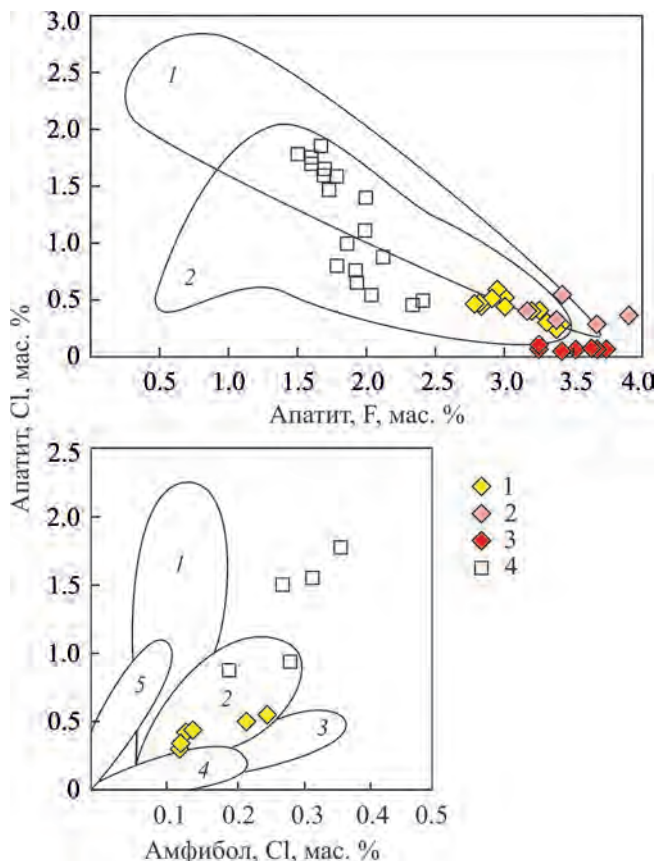


Рис. 3. Галогены в апатите и амфиболе из гранитоидов Алапаевско-Сухоложской зоны.

1–3 – породы Нижне-Синячихинского массива: 1 – тоналиты, 2 – плагиогранит-порфиры, 3 – плагиограниты; 4 – диориты Ялуниногорского массива. Поля апатитов: 1 – габбро-гранитные системы со скарново-магнетитовым оруденением, 2 – андезитоидные серии с Cu(Au,Mo)-порфировым оруденением, 3 – гранитоиды с Mo-порфировым оруденением, 4 – тоналит-гранодиоритовые серии с Au(W)-гидротермальным оруденением, 5 – медно-колчеданные месторождения (Холоднов, Бушляков, 2002).

Fig. 3. Halogens in apatite and amphibole from granitoids of the Alapaevsk-Sukhoi Log zone.

1–3 – rocks of the Nizhne-Sinyachikha massif: 1 – tonalites, 2 – plagiogranite porphyry, 3 – plagiogranites; 4 – diorites of the Yaluninogorsk massif. Fields of apatites: 1 – gabbro-granite systems with skarn-magnetite mineralization, 2 – andesitoid series with Cu(Au,Mo)-porphyry mineralization, 3 – granitoids with Mo-porphyry mineralization, 4 – tonalite-granodiorite series with Au(W)-hydrothermal mineralization, 5 – massive sulfide deposits (Kholodnov, Bushlyakov, 2002).

ство усиливается при учете апатита из более основных пород, в качестве которых мы взяли кварцевые диориты расположенного южнее Ялуниногорского габбро-диорит-плагитогранитного массива, являющегося петротипом ранне- и среднедевонских массивов северной части Алапаевско-Сухоложской зоны (Кузовков и др., 1992; Прибавкин и др., 2018).

Особенностью исследованных апатитов является крайне низкое, менее предела обнаружения, содержание серы. Интересно, что столь низкими содержаниями этого элемента часто обладают и апатиты гранитоидов, продуктивных на золото-медно-порфировый тип оруденения Урала (Холоднов, Бушляков, 2002; Грабежев, Воронина, 2012). В качестве примера можно привести данные по Биргильдинско-Томинской и Тарутинско-Новониколаевской рудным зонам на Южном Урале, к которым приурочены такие крупные месторождения меди и золота, как Михеевское, Томинское, Березняковское, Тарутинское. В этой связи встает вопрос не только об источнике серы для формирования порфировых систем, но и о поиске критериев прогнозирования продуктивных гранитоидов.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Сравнение химического состава пород ранней тоналит-плагитогранитной серии и пород главной фазы массива демонстрирует их близость практически по всем компонентам (табл. 3, рис. 4). Наблюдаемые различия по железистости (0.57 в плагитогранит-порфире, 0.71 в плагитограните) и содержанию Zr, Nb, Th могут отражать как особенности расплавов, так и ограниченное число данных. Сопоставление пород Нижне-Синячихинского и Ялуниногорского массива, данные по которому приведены в работах (Грабежев и др., 2015; Прибавкин и др., 2018), также демонстрирует их тождество как по петрогенным, так и редким и редкоземельным элементам, подтверждая правомерность их объединения в единый габбро-диорит-плагитогранитный комплекс. Кроме того, сходство пород массивов с вмещающими вулканитами рудянской толщи, данные о которых приведены в работах (Грабежев и др., 2015; Казаков и др., 2016), свидетельствует о их комагматичности раннедевонским вулканитам Алапаевско-Сухоложской зоны.

Сравнение составов пород массива с породами других уральских комплексов, продуктивными на порфировый тип оруденения, демонстрирует их подобие силурийско-девонским магматитам Салаватского, Вознесенского, Биргильдино-Томинского и отчасти Михеевского месторождений (Plotinskaya et al., 2017). Их объединяют ассоциация с базальт-андезит-риодацитовыми формациями океанических островных дуг, малокалиевый тип кислых

расплавов, низкие концентрации РЭ, РЗЭ, низкое La/Yb отношение и наличие отрицательной европиевой аномалии (см. рис. 4, 5).

Приведенные данные о составе пород и их сходстве с близкими по возрасту рудоносными магматитами Южного Урала (Plotinskaya et al., 2017) позволяют высказать предположение о формировании Нижне-Синячихинского массива в результате кристаллизации расплавов, которые могли быть получены в островодужной обстановке путем плавления амфиболитов нижней коры и последующей фракционной кристаллизации произведенных расплавов. Подчиненную роль могли играть процессы смешения с основными расплавами и ассимиляция коровых пород.

УСЛОВИЯ МАГМОГЕНЕРАЦИИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНИТОИДОВ

По отношению нормативных *Qz*, *An*, *Or* компонентов (Ферштатер, 1987; Blundy, Cashman, 2001) расплавы плагитогранитов главной фазы массива были отделены от магмы более основного состава на уровне верхней коры при 2–3 кбар (рис. 6), что предполагает наличие под массивом магматической камеры или серии камер и доказывается присутствием среди плагитогранитов крупных ксенолитов габбро ранних фаз габбро-тоналит-плагитогранитного комплекса. Определить глубину кристаллизации пород при отсутствии графических кварц-полевошпатовых сростаний, неизменного амфибола, плагиоклаза не представляется возможным. Тем не менее крупнозернистый облик пород, наличие контактовых роговиков амфибол-роговиковой фации (Кузовков и др., 1992) позволяют предполагать их формирование в закрытой системе на глубине 4–7 км. Близкими условиями магмогенерации и кристаллизации обладают жильные плагитограниты (трондьемиты) расположенного южнее Ялуниногорского массива (Прибавкин и др., 2018), которые также были отделены от диоритового расплава при 2–3 кбар и закристаллизованы при 1.5–2 кбар (на глубине 5–7 км).

В отличие от плагитогранитов главной фазы расплавы плагитогранит-порфиров были отделены при 7 кбар и более, а завершение их кристаллизации, по данным состава амфибола, находящегося в равновесии с плагиоклазом An_{12-20} , отвечало 1.8–2.3 кбар и минимальной температуре 675–736°C (Blundy, Holland, 1990; Holland, Blundy, 1994; Féménias et al., 2006; Krawczynski et al., 2012; Larocque, Canil, 2010; Mutch et al., 2016). При сходных параметрах происходило и становление ассоциированных с плагитогранит-порфирами тоналитов, что предполагает кристаллизацию пород серии в мезабиссальных условиях, а выраженный порфировый облик, по-видимому, вызван их быстрым охлаждением, причиной которого могла быть малая мощность

Таблица 3. Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в породах Нижне-Синячихинского массива

Table 3. Content of petrogenic (wt %) and rare (ppm) elements in the rocks of the Nizhne-Sinyachikha massif

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8
№ обр.	560	568	559	574	575	563	562	561
SiO ₂	61.93	64.35	68.63	69.83	70.85	47.05	71.74	77.06
TiO ₂	0.49	0.51	0.34	0.40	0.39	0.93	0.29	0.21
Al ₂ O ₃	15.37	14.82	14.97	12.84	15.44	17.19	13.55	13.67
Fe ₂ O ₃	4.75	4.07	3.25	3.56	0.68	7.80	3.08	0.00
FeO	2.2	1.4	0.5	1.4	0.4	6.4	1.2	0.4
MnO	0.12	0.10	0.06	0.09	0.02	0.27	0.06	0.01
MgO	4.25	2.84	1.59	1.93	1.28	6.00	0.88	0.11
CaO	2.67	2.96	3.23	1.60	1.18	6.75	2.21	0.23
Na ₂ O	5.47	4.86	5.06	5.69	7.80	1.93	4.02	7.12
K ₂ O	0.15	0.47	0.74	0.23	0.36	1.49	0.91	0.46
P ₂ O ₅	0.08	0.09	0.06	0.07	0.08	0.02	0.05	0.00
П.п.п.	2.17	3.33	1.39	2.15	1.39	3.44	1.77	0.71
Сумма	99.65	99.80	99.83	99.79	99.87	99.28	99.76	99.98
Fe/(Fe + Mg)	0.46	0.50	0.54	0.57	0.30	0.55	0.71	0.67
Li	6.44	5.88	3.09	4.24	4.90	5.70	4.59	—
Be	0.45	0.42	0.46	0.30	0.52	0.20	0.52	—
Cs	0.05	0.18	0.24	0.15	0.15	0.71	0.49	—
Sc	32.34	23.94	17.64	15.82	15.45	60.90	13.00	—
V	171.30	133.26	92.53	103.52	47.36	516.79	52.93	—
Cr	29.62	23.64	30.09	45.54	40.74	13.45	21.59	—
Co	10.97	8.31	5.78	5.89	1.39	31.89	6.49	—
Ni	4.63	4.94	4.12	4.11	2.64	4.96	2.98	—
Cu	4.19	9.55	3.92	40.59	4.93	99.88	5.71	—
Zn	25.57	48.58	15.31	19.37	7.47	81.11	17.83	—
Ga	16.52	13.72	12.07	10.55	13.07	17.20	12.23	—
Rb	1.18	4.25	6.36	2.08	0.67	29.48	13.62	—
Sr	240.31	206.51	291.74	125.99	138.11	209.68	159.25	—
Ba	44.73	66.04	133.13	53.48	54.17	469.93	122.93	—
Y	38.45	16.35	16.14	11.13	18.40	11.90	12.67	—
Zr	50.86	54.07	43.72	49.56	67.24	20.79	35.09	—
Hf	2.15	1.72	1.47	1.59	2.08	0.71	1.28	—
Nb	1.06	0.93	0.89	0.92	0.91	0.26	0.84	—
Ta	0.08	0.07	0.06	0.21	0.07	0.02	0.07	—
Mo	0.21	0.22	0.30	0.54	0.43	0.71	0.21	—
Sn	1.03	1.25	1.05	0.76	6.21	0.53	0.62	—
W	0.36	0.56	0.34	0.59	0.51	0.54	1.32	—
Pb	1.95	1.86	1.26	1.09	0.48	1.02	2.30	—
Th	2.31	1.88	1.44	1.67	1.58	0.31	1.77	—
U	1.29	0.88	0.56	0.45	0.88	0.18	0.91	—
La	6.53	4.71	5.26	4.76	7.26	1.69	4.73	—
Ce	17.73	11.83	12.34	9.25	17.48	4.75	10.24	—
Pr	2.74	1.63	1.63	1.22	2.90	0.78	1.38	—
Nd	13.15	7.01	7.22	5.11	12.64	4.08	5.75	—
Sm	4.06	1.90	1.99	1.34	3.31	1.38	1.48	—
Eu	0.87	0.49	0.65	0.36	0.74	0.53	0.49	—
Gd	5.10	2.21	2.41	1.58	3.53	1.84	1.70	—
Tb	0.83	0.38	0.39	0.26	0.51	0.30	0.27	—
Dy	5.78	2.72	2.64	1.84	3.22	2.16	1.93	—
Ho	1.34	0.63	0.59	0.42	0.69	0.48	0.44	—
Er	4.32	2.08	1.86	1.34	2.16	1.52	1.47	—
Tm	0.65	0.33	0.27	0.21	0.32	0.22	0.23	—
Yb	4.40	2.28	1.83	1.44	2.25	1.47	1.65	—
Lu	0.70	0.36	0.28	0.23	0.36	0.23	0.27	—

Примечание. 1–5 – тоналит-плагиогранитная серия: 1–2 – тоналит, 3–5 – плагиогранит-порфир; 6–8 – габбро-диорит-плагиогранитный комплекс: 6 – габбро, 7 – плагиогранит главной фазы, 8 – плагиоаплит.

Note. 1–5 – tonalite-plagiograniteseries: 1–2 – tonalite, 3–5 – plagiograniteporphyry; 6–8 – gabbro-diorite-plagiogranitic complex: 6 – gabbro, 7 – plagiogranite of the main phase, 8 – plagioclite.

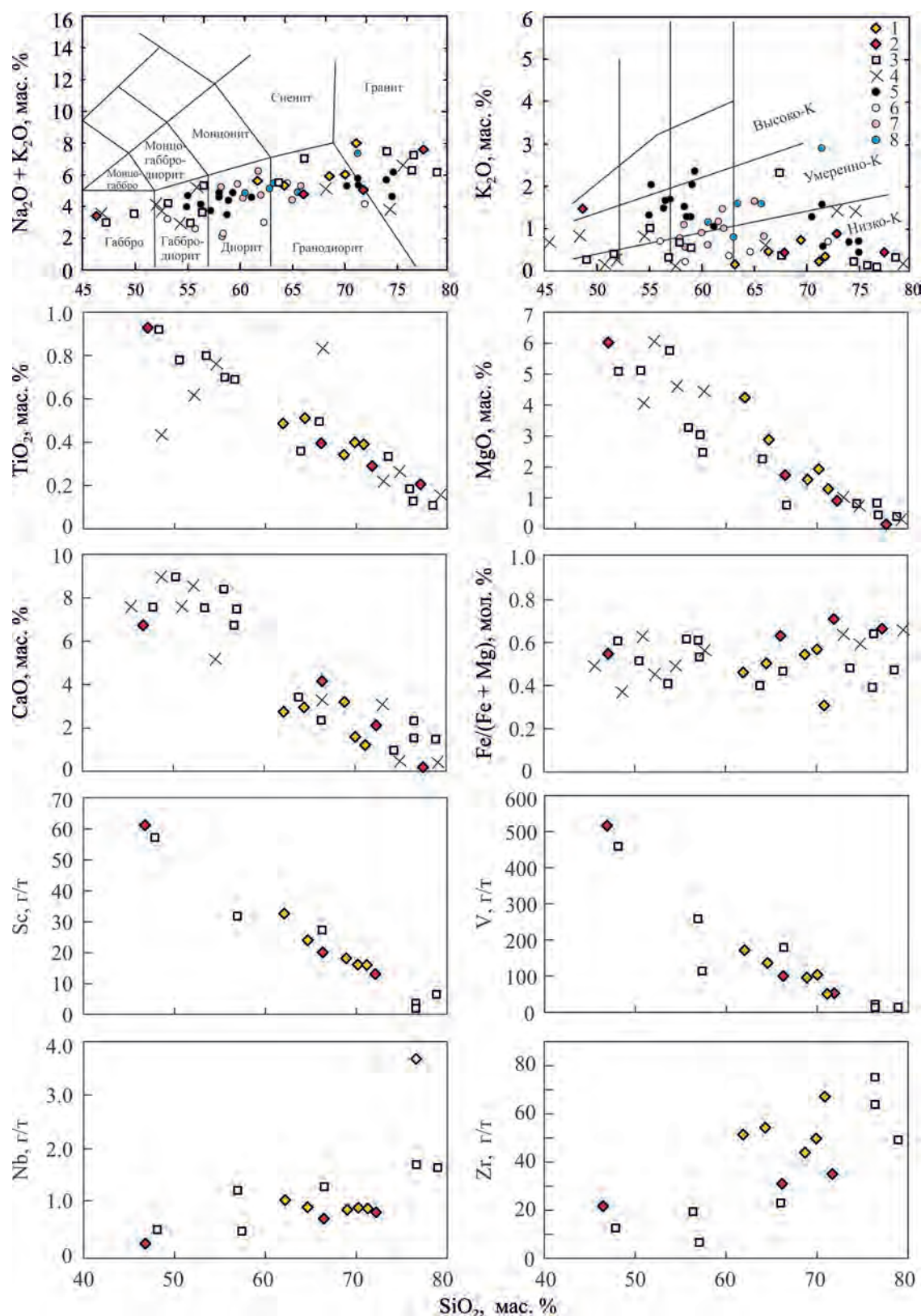


Рис. 4. Вариационные диаграммы состава пород.

1, 2 – породы Нижне-Синячихинского массива: 1 – тоналиты и плагиигранит-порфиры, 2 – плагииграниты главной фазы, габбро; 3 – породы Ялуниногорского массива, 4 – вулканиты и субвулканиты рудянской толщи (Грабежев и др., 2015; Казаков и др., 2016), 5–8 – гранитоиды месторождений: 5 – Вознесенского, 6 – Салаватского, 7 – Биргильдинского и Томинского, 8 – Михеевского Cu(Au,Mo) (Plotinskaya et al., 2016).

Fig. 4. Variational diagrams of rock composition.

1, 2 – rocks of the Nizhne-Sinyachikha massif: 1 – tonalits and plagiogranite porphyry, 2 – plagiogranites of the main phase, gabbro; 3 – rocks of the Yaluninogorsk massif; 4 – volcanic rocks and subvolcanics of the Rudyanskaya bulk (Grabezhev et al., 2015; Kazakov et al., 2016), 5–8 – granitoids deposits: 5 – Voznesensk, 6 – Salavat, 7 – Birgilda-Tomino, 8 – Mikheevskoe Cu(Au,Mo) (Plotinskaya et al., 2016).

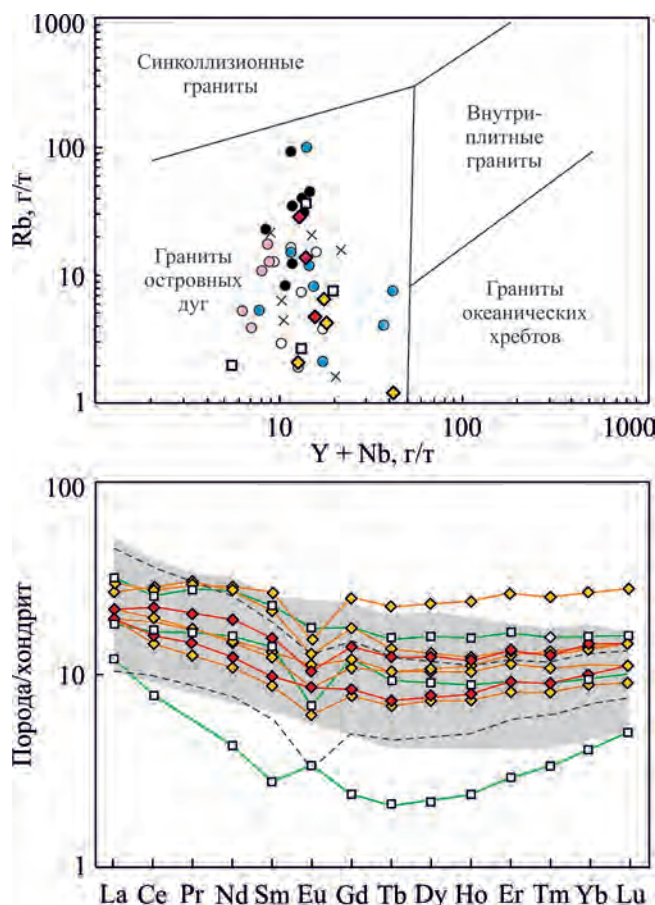


Рис. 5. Диаграмма Rb–(Y + Nb) (Pearce et al., 1984) и диаграмма распределения РЗЭ, нормализованных по хондриту.

Пунктиром показаны спектры распределения элементов в туфах риодацитов и плагиогранит-порфиров Rudyanskaya strata (Kazakov et al., 2016). Серое поле демонстрирует нормализованные спектры гранитоидов Салаватского, Вознесенского, Михеевского месторождений (Plotinskaya et al., 2017). Условные обозначения – см. рис. 4.

Fig. 5. Rb–(Y + Nb) diagram (Pearce et al., 1984) and the distribution diagram of REE normalized to chondrite.

The dotted line shows the spectra of the distribution of elements in the tufts of rhyodacite and plagiogranite porphyry of the Rudyanskaya strata (Kazakov et al., 2016). The gray field demonstrates the normalized spectra of granitoids of the Salavat, Voznesensk, Mikheevskoe deposits (Plotinskaya et al. 2017). Legend – see Fig. 4.

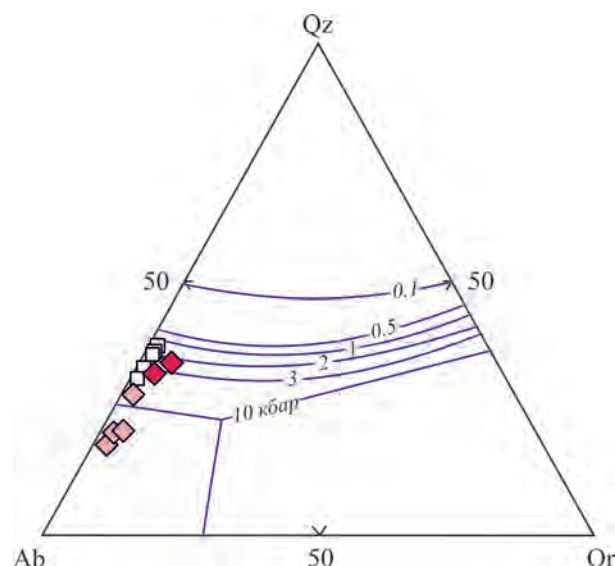


Рис. 6. Позиция составов плагиогранитов и плагиогранит-порфиров Нижне-Синячихинского массива на диаграмме Qz–Ab–Or (Blundy, Cashman, 2001).

Условные обозначения – см. рис. 3.

Fig. 6. Position of plagiogranite and plagiogranite porphyry compositions of the Nizhne-Sinyachikha massif on the Qz–Ab–Or diagram (Blundy, Cashman, 2001).

Legend – see Fig. 3.

тел или открытость магматической системы (функционирование в режиме извержений, сопровождающемся спадом давления и переохлаждением расплава). Полученные значения глубины становления пород массива помогают объяснить отсутствие в его контурах и ближайшем окружении минерализации порфирового типа, появление которой возможно лишь при расслоении флюида в области малых глубин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При детальном изучении геологического строения Нижне-Синячихинского плагиогранитного массива нами впервые была выделена ранняя тоналит-плагиогранитная серия, облик пород которой резко контрастирует с обликом преобладающих здесь плагиогранитов. Породы этой серии имеют выраженный гипабиссальный облик и представ-

лены редкопорфировыми тоналитами, прорванными многочисленными дайками плагиогранит-порфиров. Петрохимическое и геохимическое сопоставление пород серии с плагиогранитами главной фазы массива указывает на их формирование в островодужной обстановке из андезитовидных известково-щелочных низкокальциевых расплавов близкого состава.

Анализ условий магматогенеза и кристаллизации пород массива показал формирование плагиогранит-порфиров ранней серии в результате отделения их расплавов на глубине, отвечающей 7 кбар и более, с последующей кристаллизацией в верхней части островодужной коры при 1.8–2.3 кбар. Гипабиссальный облик тоналитов и плагиогранит-порфиров этой серии, по-видимому, обусловлен быстрой кристаллизацией расплавов по причине малой формы интрузивных тел и эффекта переохлаждения. Отделение плагиогранитного расплава, сформировавшего главную фазу массива, произошло в промежуточной камере, расположенной в верхней коре, при 2–3 кбар, а его кристаллизация – при 1.5–2 кбар. Эти расчеты указывают на то, что формирование пород, составляющих массив, происходило при кристаллизации расплавов, отделившихся в разноточных магматических камерах.

Сопоставление состава пород массива, концентраций галогенов и серы в апатитах с таковыми для гранитоидов Cu(Au,Mo)-порфировых месторождений Урала (Вознесенского, Салаватского, Биргильдинско-Томинской группы, Михеевского) показывает их близость. Отсутствие в массиве и его ближнем окружении сульфидной минерализации порфирового типа можно объяснить значительной глубиной формирования пород и их эрозийного среза, однако истинные причины наличия или отсутствия оруденения представляются более сложными, требующими дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бочкарев В.В., Сурин Т.Н. (1993) Вулканогенные формации и геодинамическое развитие Учалино-Алексадринской и Режевской зон Урала. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 80 с.
- Грабежев А.И., Воронина Л.К. (2012) Сера в апатите из пород медно-порфировых систем Урала. *Ежегодник-2011*. Тр ИГГ УрО РАН. Вып. 159, 68–70.
- Грабежев А.И., Коровко А.В., Азовская О.Б., Прибавкин С.В. (2015) Потенциально промышленная Алапаевско-Сухоложская медно-порфировая зона (Средний Урал). *Литосфера*, (3), 79–92.
- Казаков И.И., Стороженко Е.В., Харитонов И.Н. и др. (2016) Отчет о результатах работ по объекту “ГДП-200 листа О-41-XX (Алапаевская площадь)” за 2014–2016 гг. Екатеринбург: ОАО УГЭС. 2 кн., 1 папка. ТФГИ по Уральскому федеральному округу.
- Коровко А.В., Пуртов В.А., Бурнатная Л.Н. и др. (2004) Отчет по поисковым работам по оценке промышленной значимости Каменско-Сафьяновской меднорудной зоны Восточно-Уральского прогиба. Верх. Пышма: ОАО Среднеуральская ГРЭ. Кн. 1. 210 с. ТФГИ по Уральскому федеральному округу.
- Коротеев В.А., Дианова Т.В., Кабанова Л.Я. (1979) Среднепалеозойский вулканизм восточной зоны Урала. М.: Наука, 132 с.
- Кузовков Г.Н., Пуртов В.А., Бурнатный С.М. и др. (1992) Отчет о геологическом доизучении масштаба 1 : 50 000 Алапаевской площади и общим поискам каменного угля и меди в Алапаевском и Артемовском районах Свердловской области, проведенных в 1986–1992 гг. ТФГИ по Уральскому федеральному округу.
- Прибавкин С.В., Готтман И.А., Коровко А.В. (2018) Петрология Ялуниногорского гранитоидного массива (Алапаевско-Сухоложская медно-порфировая зона, Средний Урал). *Литосфера*, **18**(1), 46–60. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-1-046-060
- Федорова И.Б., Григорьева Г.Г., Компанец С.Н. (1971) Условия размещения медно-порфирового оруденения на Урале. *Геология медно-порфировых месторождений*. Алма-Ата: ИГН Каз. АН, 12–14.
- Ферштатер Г.Б. (1987) Петрология главных интрузивных ассоциаций. М.: Наука, 232 с.
- Холоднов В.В., Бушляков И.Н. (2002) Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: УрО РАН, 393 с.
- Blundy J., Cashman K. (2001) Ascent-driven crystallization of dacite magmas at Mount St Helens, 1980–1986. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **140**(6), 631–650.
- Blundy J., Holland T.J. (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **104**(2), 208–224.
- Féménias O., Mercier J.-C. C., Nkono C., Diot H., Berza T., Tatu M., Demaiffe D. (2006) Calcic amphibole growth and compositions in calc-alkaline magmas: Evidence from the Motru Dike Swarm (Southern Carpathians, Romania). *Am. Miner.*, **91**, 73–81.
- Holland T.J., Blundy J. (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **116**(4), 433–447.
- Krawczynski M.J., Grove T.L., Behrens H. (2012) Amphibole stability in primitive arc magmas: effects of temperature, H₂O content, and oxygen fugacity. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **164**(2), 317–339.
- Larocque J., Canil D. (2010) The role of amphibole in the evolution of arc magmas and crust: the case from the Jurassic Bonanza arc section, Vancouver Island, Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **159**(4), 475–492.
- Mutch E.J.F., Blundy J.D., Tattitch B.C., Cooper F.J., Brooker R.A. (2016) An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **171**, 85. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1298-9>
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrology*, **25**, 956–983.
- Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Tossalina S., Selmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: Geological framework and metallogeny. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 153–173.

REFERENCES

- Blundy J., Cashman K. (2001) Ascent-driven crystallization of dacite magmas at Mount St Helens, 1980–1986. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **140**(6), 631–650.
- Blundy J., Holland T.J. (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **104**(2), 208–224.
- Bochkarev V.V., Surin T.N. (1993) *Vulkanogennyye formatsii i geodinamicheskoe razvitiye Uchalino-Aleksandrinskoy i Rezhevskoy zon Urala* [The Volcanic formation and geodynamic development of the Uchalino-Alexandrina and Rezhevskoy regions of the Ural]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 80 p. (In Russian)
- Fedorova I.B., Grigor'eva G.G., Kompaneets S.I. (1973) Conditions for placing copper-porphyry mineralization in the Urals. *Geologiya medno-porfirovykh mestorozhdenii* [Geology of copper-porphyry deposits]. Alma-Ata, IGK Kaz. Akad. Nauk, 12–14. (In Russian)
- Féménias O., Mercier J.-C. C., Nkono C., Diot H., Berza T., Tatu M., Demaiffe D. (2006) Calcic amphibole growth and compositions in calc-alkaline magmas: Evidence from the Motru Dike Swarm (Southern Carpathians, Romania). *Am. Miner.*, **91**, 73–81.
- Fershtater G.B. (1987) *Petrologiya glavnykh intruzivnykh assotsiatsiy* [Petrology of the main intrusive associations]. Moscow, Nauka Publ., 232 p. (In Russian)
- Grabazhev A.I., Korovko A.V., Azovskova O.B., Pribavkin S.V. (2015) Potentially commercial Alapaevsk-Sukhoi Log porphyry copper zone (the Middle Urals). *Litosfera*, (3), 79–92. (In Russian)
- Grabazhev A.I., Voronina L.K. (2012) *Sera v apatite iz porod medno-porfirovykh sistem Urala* [Sulfur in apatite from rocks of porphyry copper systems of the Urals]. *Ezhegodnik-2011*. Tr. IGG UrO RAN, Vyp. 159, 68–70. (In Russian)
- Holland T.J., Blundy J. (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **116**(4), 433–447.
- Kazakov I.I., Storozhenko E.V., Kharitonov I.N. i dr. (2016) *Otchet o rezul'tatakh rabot po ob'ektu "GDP-200 lista O-41-XX (Alapaevskaya ploshchad)" za 2014–2016 gg.* [A report on the results of work on the project "GDP-200 sheet O-41-XX (Alapaevsk area)" for 2014–2016]. Ekaterinburg, OAO UGSE. 2 Books, 1 folder. (In Russian, unpublished)
- Kholodnov V.V., Bushlyakov I.N. (2002) *Galogeny v endogenom rudoobrazovanii* [Halogens in the endogenous ore formation]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 394 p. (In Russian)
- Koroteev V.A., Dianova T.V., Kabanova L.Ya. (1979) *Srednepaleozoiskii vulkanizm vostochnoi zony Urala* [Middle-Paleozoic volcanism of the East Zone of the Middle Urals]. Moscow, Nauka Publ., 132 p. (In Russian)
- Korovko A.V., Purtov V.A., Burnatnaya L.N. i dr. (2004) *Otchet po poiskovym rabotam po otsenke promyshlennoi znachimosti Kamensko-Saf'yanovskoi mednorudnoi zony Vostochno-Ural'skogo progiba* [Report on the prospecting to assess the significance of the industrial Kamensko-Safyanovskaya copper ore zone of the East-Ural Trough]. Verkh. Pyshma, OAO SU GRE Publ., Kn. 1, 210 p. (In Russian, unpublished)
- Krawczynski M.J., Grove T.L., Behrens H. (2012) Amphibole stability in primitive arc magmas: effects of temperature, H₂O content, and oxygen fugacity. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **164**(2), 317–339.
- Kuzovkov G.N., Purtov V.A., Burnatnyi S.M. i dr. (1992) *Geologicheskii otchet o geologicheskom doizuchenii masshtaba 1 : 50 000 Alapaevskoi ploshchadi i obshchim poiskam kamennogo uglya i medi v Alapaevskom i Artemovskom raionakh Sverdlovskoi oblasti, provedennykh v 1986–1992 gg.* [The Geological report on additional exploration geological scale 1 : 50 000 Alapaevsk area and a common search for coal and copper in Alapaevsk and Artemovsk areas of the Sverdlovsk region, conducted in 1986–1992]. Verkh. Pyshma. (In Russian unpublished)
- Larocque J., Canil D. (2010) The role of amphibole in the evolution of arc magmas and crust: the case from the Jurassic Bonanza arc section, Vancouver Island, Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **159**(4), 475–492.
- Mutch E.J.F., Blundy J.D., Tattitch B.C., Cooper F.J., Brooker R.A. (2016) An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **171**, 85. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1298-9>
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrology*, **25**, 956–983.
- Plotinskaya O.Y., Grabazhev A.I., Tessalina S., Selmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: Geological framework and metallogeny. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 153–173.
- Pribavkin S.V., Gottman I.A., Korovko A.V. (2018) Petrology of Yaluninogorsk granitoid massive (Alapaevsk-Sukhoi Log porphyry copper zone, Middle Urals). *Litosfera*, **18**(1), 46–60. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-1-046-060. (In Russian)