

УДК 552.11:553.41

DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-607-620

## ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУДОВМЕЩАЮЩИХ ЭФФУЗИВНЫХ И ИНТРУЗИВНЫХ ПОРОД НИКОЛАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТО-ПОРФИРОВОГО ТИПА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2018 г. С. Е. Знаменский<sup>1</sup>, В. В. Холоднов<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт геологии УФИЦ РАН, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, e-mail: Znamensky\_Sergey@mail.ru<sup>2</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: holodnov@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 09.06.2017 г., принята к печати 02.10.2017 г.

**Объект исследований.** В статье рассмотрены результаты геохимических исследований рудовмещающих эффузивных и интрузивных пород Николаевского месторождения, расположенного в зоне Главного Уральского разлома на Южном Урале. Месторождение относится к нетрадиционному и слабо изученному на Урале золото-порфировому типу. **Материалы и методы.** Определение состава пород выполнено методами химического анализа (ИГ УФИЦ РАН), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре ELAN 9000 (ИГГ УрО РАН) и рентгено-флуоресцентного анализа на спектрометре VRA 30 (ИГ УФИЦ РАН). **Результаты.** Установлено, что золото-порфировое оруденение ассоциирует с островодужным вулкано-интрузивным комплексом, объединяющим плагиофировые и пироксен-плагиофировые базальты, их туфы, интрузии габбро и рудоносную серию даек плагиофировых долерит-порфиринов и габбро-диорит-порфиринов. Породы комплекса, включая рудоносные дайки, имеют нормальную щелочность, толеитовый и переходный от толеитового к известково-щелочному состав. Среди вулканогенных формаций, фаунистически датированных в зоне Главного Уральского разлома на Южном Урале, по ряду геохимических параметров (например, отношениям Zr/Nb и Nb/Th) эффузивные и интрузивные образования месторождения наиболее близки к вулканитам колчедановосной баймак-бурибаевской свиты ( $D_1c_2$ ), залегающей в основании разреза Магнитогорской островной дуги, и, по всей вероятности, являются их возрастным аналогом. В то же время золотоносный комплекс отличается от баймак-бурибаевской свиты общей повышенной железистостью и титанистостью, при пониженной магнезиальности всех разновидностей пород, а также отсутствием бонинитов и кремнекислых вулканитов, преобладанием порфировых типов пород, что может быть обусловлено особенностями геодинамической обстановки его образования. **Выводы.** Анализ геохимических данных с использованием диаграмм  $(La/Sm)_N-TiO_2$  и  $V-Ti/1000$  дает основание предполагать, что Николаевское месторождение сформировалось в зоне сопряжения островной дуги и задугового бассейна. Золото-порфировое оруденение, связанное с вулканическими процессами позднеэмского возраста, выделено на Южном Урале впервые.

**Ключевые слова:** Южный Урал, золото-порфировое оруденение, редкие и редкоземельные элементы, геодинамическая позиция

## PETROLOGICAL-GEOCHEMICAL FEATURES OF ORE-BEARING EFFUSIVE AND INTRUSIVE ROCKS OF THE NIKOLAEVSKOE GOLD-PORPHYRY DEPOSIT (THE SOUTHERN URALS)

Sergei E. Znamensky<sup>1</sup>, Vladimir V. Holodnov<sup>2</sup><sup>1</sup>Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre, RAS, 16/2 K. Marx st., Ufa, 450007, Russia, e-mail: Znamensky\_Sergey@mail.ru<sup>2</sup>A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016, Russia, e-mail: holodnov@igg.uran.ru

Received 09.06.2017, accepted 02.10.2017

**Object.** The article considers the results of geochemical studies of ore-bearing effusive and intrusive rocks of the Nikolaevka gold deposit, located in the zone of the Main Uralian fault in the Southern Urals. The deposit belongs to the gold-porphyry type which unconventional for the Urals and poorly studied here. **Methods.** The rock composition was determined by chemical analysis (IG UFRC RAS), mass-spectrometry with inductively coupled plasma on the ELAN 9000 quadrupole mass-spectrometer (IGG UB RAS) and X-ray fluorescence analysis on the VRA 30 spectrometer (IG

**Для цитирования:** Знаменский С.Е., Холоднов В.В. (2018) Петролого-геохимические особенности рудовмещающих эффузивных и интрузивных пород Николаевского месторождения золото-порфирового типа (Южный Урал). *Литосфера*, **18**(4), 607–620. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-607-620

**For citation:** Znamensky S.E., Holodnov V.V. (2018) Petrological-geochemical features of ore-bearing effusive and intrusive rocks of the Nikolaevskoe gold-porphyry deposit (the Southern Urals). *Litosfera*, **18**(4), 607–620. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-607-620

UFRC RAS). *Results.* It is established that gold-porphyry mineralization associated with an island-arc volcanic-intrusive complex that unites plagiophytic and pyroxene-plagiophytic basalts, their tuffs, gabbro intrusions and ore-bearing series of dikes plagiophytic dolerite-porphyrates and gabbro-diorite-porphyrates. The rocks of the complex, including ore-bearing dikes, have normal alkalinity, tholeiitic and transition from tholeiitic to calc-alkaline composition. Among the volcanogenic formations, faunistically dated in the zone of the Main Ural fault in the Southern Urals, by a number of geochemical parameters (for example, the ratios of Zr/Nb and Nb/Th) the effusive and intrusive rocks of the deposit are the closest to the volcanics of the pyrite-bearing Baymak-Buribay Formation ( $D_{1e2}$ ), lying at the base of the section of the Magnitogorsk island arc, and, in all probability, are their age analog. At the same time, the gold-bearing complex differs from the Baymak-Buribay Formation by a general increased iron and titanium content, with a reduced magnesia of all rock types, as well as the absence of boninites and acid volcanics, the predominance of porphyry rock types, which can be due to the geodynamic conditions of its formation. *Conclusion.* Geodynamic analysis of geochemical data using diagrams (La/Sm)N–TiO<sub>2</sub> and V–Ti/1000 suggests that the Nikolaevka deposit was formed in the articulation zone of the island arc and the back-arc basin. Gold-porphyry mineralization associated with the Late Emsian volcanic processes was isolated in the Southern Urals for the first time.

**Keywords:** the Southern Urals, gold-porphyry mineralization, rare and rare-earth elements, geodynamic position

#### Acknowledgements

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, grant No. 17-45-020717 and partial financing within the framework of the topic of the State task IGG UB of RAS 0393-2018-0027.

## ВВЕДЕНИЕ

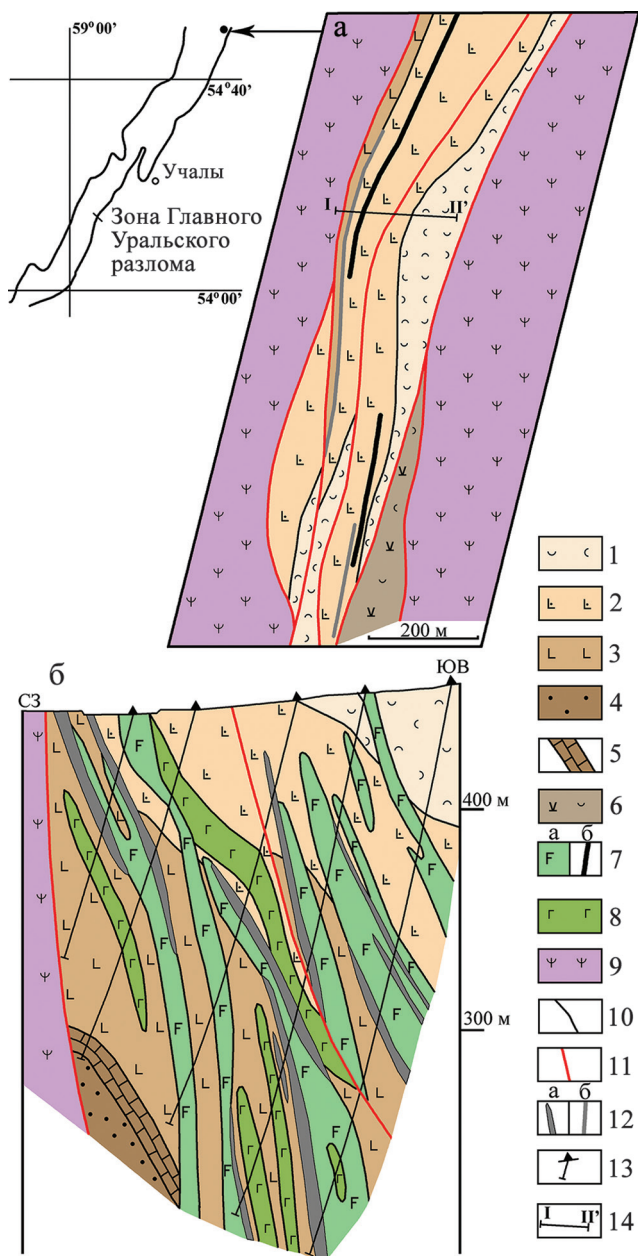
Николаевское месторождение золота расположено в зоне Главного Уральского разлома (ГУР) на северном окончании Магнитогорской мегазоны, в 65 км северо-восточнее г. Учалы Республики Башкортостан (рис. 1). Предыдущими исследователями оно было отнесено к золото-сульфидной прожилково-вкрапленной формации [Бердников, 1986]. Золото-сульфидная формация представлена в мегазоне двумя основными типами месторождений: 1) орогенными в вулканогенно-осадочных и углеродсодержащих осадочных комплексах, подвергшихся позднепалеозойским коллизионным деформациям, и 2) связанными с комплексами малых интрузий и даек позднепалеозойского возраста [Знаменский, 2009; Знаменский и др., 2015]. В настоящей статье показано, что Николаевское месторождение обладает признаками золоторудных объектов “порфирового типа”. Золотоносная прожилково-вкрапленная минерализация на этом месторождении тесно пространственно связана с дайками порфировых пород, входящими в состав островодужного вулcano-интрузивного комплекса. Породы этого комплекса по геохимическим параметрам близки к вулканитам колчедановосной баймак-бурибаевской свиты ( $D_{1e2}$ ).

Золото-порфировое оруденение, считавшееся нетипичным для Уральского орогена, в последние годы приобретает все большее экономическое значение. В настоящее время эксплуатируется Юбилейное месторождение, расположенное на южном фланге Магнитогорской мегазоны в Западных Мугоджарах [Грабежев, 2014]. Несколько перспективных проявлений Cu-Au-порфировой минерализации известно на северном окончании Магнитогорской мегазоны (рудопоявления Миасской группы) [Белгородский, Шалагинов, 1999; Грабежев,

2012]. На Полярном Урале недавно открыто Петропавловское месторождение с запасами золота 30 т [Мансуров, 2016].

Вопросам происхождения, закономерностей размещения и связей Cu( $\pm$ Au, Mo)-порфировых месторождений Урала с магматизмом посвящена обширная литература [Кривцов, 1983; Грабежев, Белгородский, 1992; Белгородский, Шалагинов, 1999; Грабежев, 2012, 2014; Контарь, 2013; Косарев и др., 2014; Plotinskaya et al., 2017; и др.]. По геодинамическим условиям формирования и возрасту Cu( $\pm$ Au, Mo)-порфировые месторождения Магнитогорской мегазоны разделяются на две основные группы: 1) образовавшиеся в островодужной обстановке ( $D_2$ ) и 2) сформировавшиеся в условиях ранней (мягкой, по В.Н. Пучкову [2010]) коллизии девонской островной дуги с краем Восточно-Европейской платформы ( $D_3$ - $C_1$ ) [Plotinskaya et al., 2017].

Для островодужной стадии развития мегазоны характерно Cu- и Cu-Au-порфировое оруденение, которое, по представлениям многих исследователей [Кривцов, 1983; Грабежев, Белгородский, 1992; Белгородский, Шалагинов, 1999; Plotinskaya et al., 2017; и др.], связано главным образом с ирендыкской базальт-андезито-базальтовой формацией ( $D_2$ ). Предполагается, что месторождения локализованы в барьерных зонах палеоостровной дуги по периферии колчедановосных ореолов. Проявления порфировой минерализации приурочены к интрузиям габбро-диоритового (Салаватское месторождение, Медногорское рудопоявление) и габбро-диорит-гранодиоритового (Вознесенское месторождение и др.) состава, которые принадлежат к Na и K-Na известково-щелочной сериям соответственно [Plotinskaya et al., 2017]. По данным Е.А. Белгородского и А.Э. Шалагинова [1999], продуктивные габбро-диоритовые интрузии Миасской группы



**Рис. 1.** Геологическая схема и разрез Николаевского месторождения (составлены с использованием материалов Учалинского филиала ОАО «Башкиргеология»).

1 – слоистые туфы и тейроиды основного состава и кремнистые сланцы четвертой толщи; 2 – пироксен-плагифиристые, иногда плагифиристые базальты и их туфы третьей толщи; 3 – плагифиристые базальты, с подчиненными прослоями гиаокластитов и туфов основного состава второй толщи; 4–5 – первая толща: 4 – глинисто-кремнистые сланцы, вулканомиктовые алевролиты, песчаники и гравелиты, 5 – органогенные известняки; 6 – вулканогенно-осадочные породы ирендыкской свиты ( $D_2$ ) (?); 7 – дайки долерит-порфиров и габбро-диорит-порфиров на разрезе (а) и наиболее крупные дайки на схеме (б); 8 – габбро; 9 – серпентиниты и серпентинитовый меланж; 10 – геологические границы; 11 – разломы; 12 – рудные тела на разрезе (а) и схеме (б); 13 – скважины; 14 – линия геологического разреза и ее номер.

**Fig. 1.** Geological scheme and cross section of the Nikolaevka deposit (compiled using materials of the Uchalinsky branch of OJSC “Bashkirgeology”).

1 – layered tuffs and tephroids of basalts and siliceous schists of the fourth deposit; 2 – pyroxene-plagiophyre, sometimes plagiophyre basalts and their tuffs of the third deposit; 3 – plagiophyre basalts, with subordinate layers of hyaloclastites and tuffs of basalts of the second deposit; 4–5 – first deposit: 4 – clayey-siliceous schists, volcanomictic siltstones, sandstones and gravelstones, 5 – organogenic limestones; 6 – volcanogenic-sedimentary rocks of the Irendyk formation ( $D_2$ ) (?); 7 – dykes of dolerite-porphyrates and gabbro-diorite-porphyrates on section (a) and the largest dikes in scheme (b); 8 – gabbro; 9 – serpentinites and serpentinite melange; 10 – geological boundaries; 11 – faults; 12 – ore bodies on section (a) and scheme (b); 13 – boreholes; 14 – geological section line and its number.

Сu-Au-порфировых проявлений (Медногорского, Касеевского и др.), соответствующие по возрасту ирендыкской свите, имеют субщелочной состав.

С процессами мягкой коллизии связано образование в мегазоне Au- (Юбилейное месторождение, абсолютный возраст  $373 \pm 3$  млн лет) и Mo- (Верхнеуральское рудопоявление, абсолютный возраст  $341 \pm 1$  млн лет) порфирового оруденения [Грабежев, 2014; Plotinskaya et al., 2017]. На Юбилейном месторождении рудоносные плагиоадамеллит-порфиры принадлежат к К-Na известково-щелочной петрогенетической серии. Мо-порфировое оруденение Верхнеуральского, а также Моссовского рудопоявления приурочено к интрузивным массивам субщелочного состава.

Несмотря на проведенные детальные исследования, степень изученности порфировых месторождений и рудопоявлений Магнитогорской мегазоны остается недостаточной. Особенно это касается возраста массивов и их соотношений с вмещающими вулканогенными комплексами на островодужных объектах. В последнее время для рудоносных массивов некоторых проявлений зоны ГУР получены абсолютные датировки (Вознесенское –  $412 \pm 3$  млн лет, Карагайкульское –  $418 \pm 25$  млн лет [Косарев и др., 2014]), позволяющие предполагать проявление интрузивного магматизма островодужной геохимической специфики и связанного с ним порфирового оруденения уже в раннем девоне. По нашим данным, на этих проявлениях порфировая минерализация пространственно ассоциирует с пирит-пирротин-халькопиритовым колчеданным оруденением ивановского типа. Колчеданное оруденение этого типа установлено в зоне ГУР в горизонтах серпентинитового олистограмма [Зайков и др., 2009], подстилающего вулканогенные толщи баймак-бурибаевской свиты [Косарев, 2007, 2015]. Золото-порфировое оруденение, связанное в мегазоне с магматизмом позднеэмского возраста, насколько нам известно, до настоящего времени описано не было. Поэтому выяснение индикаторных палеовулканических, магматических и



геодинамических факторов формирования золото-порфирового оруденения Николаевского месторождения, которые можно использовать в прогнозных построениях, представляется весьма актуальной задачей.

Цель статьи – рассмотреть петролого-геохимические особенности рудовмещающих эффузивных и интрузивных пород месторождения и геодинамические обстановки их формирования.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для аналитических исследований были отобраны из керна поисково-разведочных скважин. Содержания петрогенных компонентов в породах определялись в химической лаборатории ИГ УНЦ РАН (г. Уфа) стандартным методом силикатного химического анализа. Определения редких элементов выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре ELAN 9000 в лаборатории физических и химических методов исследований ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург), а также частично в ИГ УНЦ РАН на рентгено-флуоресцентном спектрометре VRA 30. Результаты анализов приведены в табл. 1.

## КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение приурочено к блоку осадочных и вулканических пород, залегающему среди меланжированных серпентинитов (см. рис. 1). Рудоносный блок состоит из серии чешуй, ограниченных взбросами крутого юго-восточного падения. Рудовмещающие отложения фаунистически не датированы. В.В. Бабкиным, проводившим в 1978–1982 гг. в этой части зоны ГУР геолого-съёмочные работы масштаба 1 : 50 000, они были отнесены к ирендыкской свите ( $D_2$ ). Однако по петрографическим и фаціальным характеристикам пород разрез месторождения существенно отличается от ирендыкской свиты, основной объём которой в северной части Магнитогорской мегазоны, в том числе и в зоне ГУР, составляют брекчии пироксен-плагиоклазовых порфириров. По нашим данным, он разделяется на четыре толщи (снизу вверх): 1) кремнистые и глинисто-кремнистые сланцы, вулканомиктовые алевролиты, песчаники и гравелиты, органогенные известняки; 2) порфировые плагиоклазовые базальты с подчиненными прослоями гиадокластитов и туфов основного состава; 3) порфировые пироксен-плагиоклазовые, иногда плагиофировые базальты и их туфы; 4) слоистые туфы и тефroidы основного состава, кремнистые сланцы (см. рис. 1). Общая мощность рудовмещающих пород составляет 300–350 м. Имеющиеся палеонтологические данные, хотя и косвенные, позволя-

ют предполагать раннедевонский возраст, по крайней мере, нижней толщи. В пользу такого предположения свидетельствуют находки В.А. Масловым и О.В. Артюшковой [2010] кремнистых сланцев с нижнедевонскими конодонтами в тектонической линзе, расположенной непосредственно к востоку от рудоносного блока Николаевского месторождения. Кремни переслаиваются здесь с вулканомиктовыми породами, которые по составу аналогичны отложениям нижней толщи месторождения и также залегают в основании разреза основных вулканитов.

Стратифицированные отложения прорваны на месторождении интрузивными телами, возможно силлами габбро и более поздними многочисленными дайками плагиофировых долерит-порфириров и габбро-диорит-порфириров.

Рудные тела месторождения представляют собой линейные сульфидно-карбонат-кварцевые штокверки с самородным золотом, сопровождающиеся ореолами вкрапленной сульфидной минерализации. Среди сульфидов преобладает пирит. В подчиненном количестве присутствуют арсенопирит, пирротин, халькопирит и галенит. Размещение золоторудной минерализации контролируется в основном эндо- и экзоконтактовыми зонами даек долерит-порфириров и габбро-диорит-порфириров (см. рис. 1). Вокруг рудных тел развиты мощные ореолы пропилитов (ассоциация хлорит, эпидот, пренит, альбит, кварц, иногда серицит или биотит). Кроме того, рудовмещающие породы подверглись в пределах рудоносного блока послерудному зеленосланцевому метаморфизму эпидот-актинолитовой фации. Наиболее интенсивно метаморфические изменения проявились в зонах вторичных разрывов чешуйчатого взброса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В статье охарактеризован химический состав базальтов второй и третьей толщ, а также интрузивных образований (см. табл. 1). Поскольку эффузивные и интрузивные породы затронуты метасоматическими и метаморфическими изменениями в пределах всего рудоносного блока, при анализе геохимических данных нами преимущественно использовались элементы, малоподвижные при вторичных процессах [Pearce, 2014].

Все разновидности изученных эффузивных и интрузивных пород месторождения имеют повышенную щелочность (рис. 2а) главным образом за счет высоких содержаний  $Na_2O$ . По нашему мнению, повышенные концентрации  $Na_2O$  могут иметь вторичное происхождение и в значительной мере связаны с альбитизацией пород в ореолах пропилитизации. На это указывает обратная корреляционная связь между содержаниями  $Na_2O$  и  $CaO$  во всех

**Таблица 1.** Содержание петрогенных окислов (мас. %) и редких элементов (г/т) в эффузивных и интрузивных породах Николаевского месторождения

**Table 1.** Concentration of petrogenic (wt %) and trace (ppm) elements in effusive and intrusive rocks of the Nikolaevka deposit

Компонент/ образец	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
SiO <sub>2</sub>	51.00	48.50	48.50	49.10	50.00	48.40	48.5	52.00	52.40	49.00
TiO <sub>2</sub>	1.07	0.96	0.94	1.07	1.60	0.54	0.53	0.55	0.33	1.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.00	15.00	15.00	14.00	16.60	15.00	14.00	14.85	15.10	16.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.87	7.19	7.51	9.00	9.10	3.70	5.70	6.42	5.00	7.00
FeO	7.18	7.04	6.75	5.57	2.90	6.47	6.47	5.46	4.45	7.45
MnO	0.16	0.16	0.17	0.17	0.06	0.14	0.16	0.21	0.14	0.14
CaO	5.39	4.54	4.97	4.26	5.54	5.11	5.68	4.69	5.71	7.50
MgO	3.40	6.80	6.20	7.00	7.80	10.00	8.20	7.60	6.50	5.00
Na <sub>2</sub> O	4.40	5.40	5.00	4.75	4.00	4.60	4.70	5.00	5.10	4.10
K <sub>2</sub> O	1.00	0.30	0.50	0.30	0.80	0.25	0.10	0.25	0.10	0.36
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.06	0.06	0.06	0.17	0.04	0.08	0.08	0.08	0.16
П.п.п.	3.76	4.20	4.40	4.24	1.60	5.21	5.18	3.10	4.60	3.00
Σ	99.35	100.15	100.00	99.52	101.17	99.46	99.30	100.21	99.51	101.01
Li	4.270	—	—	4.518	3.955	6.309	8.262	—	—	11.25
Be	0.194	—	—	0.090	0.180	0.111	0.151	—	—	0.60
Sc	19.972	—	—	19.294	13.811	18.144	26.898	—	—	32.91
V	139.994	231	286	166.759	188.489	119.803	188.999	202	142	445.66
Cr	10.540	—	—	4.984	35.136	33.069	20.541	—	—	2.7
Co	22.046	—	—	20.755	16.611	19.384	26.948	—	—	39.16
Ni	17.278	—	—	9.095	15.657	17.099	15.648	—	—	13.13
Cu	14.795	—	—	103.259	10.995	39.740	101.630	—	—	55.41
Zn	40.241	—	—	59.925	83.991	27.590	42.325	—	—	74.84
Rb	2.190	—	—	1.288	0.607	0.644	1.255	—	—	0.62
Sr	98.488	—	—	29.056	41.504	58.271	62.185	—	—	545.4
Y	10.169	17	18	9.490	13.889	5.966	10.269	19	11	25.95
Zr	28.334	39	27	21.089	51.253	8.600	16.730	37	33	51.46
Nb	0.835	—	—	0.377	3.396	0.225	0.492	—	—	3.83
Mo	0.056	—	—	0.148	1.275	0.050	0.219	—	—	0.45
Ag	0.172	—	—	0.127	0.116	0.040	0.197	—	—	0.1
Sn	0.366	—	—	0.332	0.614	0.158	0.234	—	—	0.71
Sb	0.354	—	—	0.391	0.601	0.175	0.465	—	—	2.29
Cs	0.091	—	—	0.231	0.093	0.068	0.136	—	—	0.13
Ba	132.025	—	—	54.596	19.371	20.603	38.271	—	—	23.45
La	1.675	—	—	1.434	4.276	0.541	1.393	—	—	6.48
Ce	4.382	—	—	3.738	10.613	1.395	3.349	—	—	15.53
Pr	0.695	—	—	0.578	1.537	0.223	0.530	—	—	2.16
Nd	3.556	—	—	2.922	7.132	1.209	2.652	—	—	10.35
Sm	1.180	—	—	0.982	2.007	0.475	0.958	—	—	2.96
Eu	0.441	—	—	0.338	0.679	0.186	0.366	—	—	1.4
Gd	1.542	—	—	1.339	2.410	0.720	1.349	—	—	3.42
Tb	0.266	—	—	0.234	0.396	0.137	0.258	—	—	0.62
Dy	1.817	—	—	1.574	2.542	0.957	1.780	—	—	3.7
Ho	0.403	—	—	0.358	0.554	0.216	0.408	—	—	0.87
Er	1.219	—	—	1.088	1.647	0.678	1.276	—	—	2.3
Tm	0.179	—	—	0.156	0.240	0.099	0.191	—	—	0.36
Yb	1.206	—	—	1.009	1.575	0.636	1.221	—	—	2.15
Lu	0.183	—	—	0.150	0.233	0.097	0.192	—	—	0.35
Hf	0.878	—	—	0.634	1.423	0.294	0.611	—	—	1.31
Ta	0.053	—	—	0.026	0.218	0.018	0.045	—	—	0.19
W	0.567	—	—	0.321	6.505	0.187	0.337	—	—	1.62
Re	H.o.	—	—	H.o.	H.o.	H.o.	H.o.	—	—	H.o.
Au	H.o.	—	—	0.011	0.015	H.o.	0.007	—	—	0.01
Tl	0.012	—	—	0.008	0.021	0.003	0.003	—	—	H.o.
Pb	0.413	—	—	0.404	6.172	0.113	0.899	—	—	5.05
Bi	0.008	—	—	0.053	0.010	0.005	0.013	—	—	0.01
Th	0.330	—	—	0.228	0.606	0.078	0.248	—	—	0.69
U	1.081	—	—	0.270	0.240	0.075	0.164	—	—	0.42

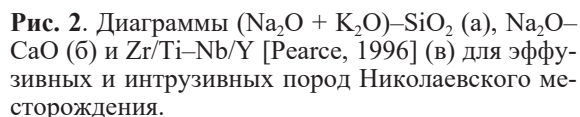
Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

Компонент/ образец	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20
SiO <sub>2</sub>	44.00	48.00	48.40	50.00	50.20	51.00	51.00	53.0	53.60	54.0
TiO <sub>2</sub>	1.07	0.60	1.71	0.72	0.54	0.48	0.54	1.10	0.94	1.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.10	16.00	15.00	14.60	15.10	15.00	14.80	17.00	17.60	17.68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.40	6.49	5.40	5.45	5.23	6.22	4.30	3.70	3.40	2.69
FeO	5.75	4.20	8.99	5.83	5.90	4.11	5.52	4.31	4.60	6.10
MnO	0.17	0.12	0.20	0.27	0.22	0.18	0.16	0.13	0.15	0.17
CaO	7.80	8.52	5.11	6.24	5.82	5.26	4.76	5.18	5.11	4.40
MgO	9.00	6.00	7.40	7.60	7.66	7.80	9.00	4.40	6.20	5.80
Na <sub>2</sub> O	4.40	4.00	4.60	4.80	4.00	4.80	4.75	4.55	4.75	5.00
K <sub>2</sub> O	0.30	0.27	0.25	0.50	0.40	0.40	0.10	0.35	0.45	0.26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.10	0.25	0.07	0.06	0.08	0.08	0.13	0.13	0.27
П.п.п.	7.47	6.46	3.05	3.60	4.80	4.50	4.53	5.48	3.30	3.12
Σ	99.62	100.76	100.36	99.68	99.93	99.83	99.54	99.33	100.23	100.59
Li	5.413	5.890	5.373	—	21.59	—	11.42	3.169	4.499	2.313
Be	0.167	0.137	0.280	—	0.30	—	0.27	0.142	0.195	0.187
Sc	18.993	23.656	22.824	—	35.24	—	38.32	13.698	20.033	8.752
V	138.110	193.213	245.601	216	182.87	199	255.42	141.524	156.588	159.074
Cr	13.990	44.782	13.136	—	21.07	—	189.57	5.212	13.864	3.177
Co	22.243	24.016	28.495	—	35.12	—	37.42	13.628	16.374	9.180
Ni	22.904	23.070	9.708	—	98.08	—	67.77	9.497	10.806	2.676
Cu	37.781	103.297	122.990	—	58.82	—	132.68	30.436	19.562	12.276
Zn	55.554	47.049	50.953	—	72.88	—	133.49	35.394	29.857	26.230
Rb	3.516	1.139	0.904	—	8.63	—	1.07	0.405	0.482	0.239
Sr	85.441	116.055	93.589	—	162.34	—	104.23	29.347	46.473	18.129
Y	11.217	14.699	22.266	14	8.89	14	13.8	11.546	8.273	14.974
Zr	29.374	31.451	51.440	40	12.09	33	21.12	26.209	16.004	47.187
Nb	0.922	1.249	4.023	—	0.78	—	0.6	0.904	0.611	2.841
Mo	0.142	0.308	0.333	—	0.29	—	0.24	0.312	0.077	0.177
Ag	0.074	0.119	0.184	—	0.07	—	0.1	0.091	0.049	0.099
Cd	0.253	0.053	0.094	—	0.10	—	0.41	0.031	0.022	0.034
Sn	0.253	0.387	0.830	—	0.18	—	0.38	0.290	0.114	0.410
Sb	0.342	0.301	0.679	—	0.65	—	0.75	0.330	0.317	0.521
Cs	0.734	0.168	0.042	—	0.37	—	0.27	0.053	0.087	0.032
Ba	34.402	29.832	31.232	—	195.5	—	33.55	13.173	24.386	10.681
La	1.655	2.362	5.745	—	0.93	—	1.07	2.363	0.933	4.554
Ce	4.519	5.827	13.897	—	2.54	—	2.86	5.538	2.456	11.021
Pr	0.719	0.841	2.003	—	0.40	—	0.45	0.810	0.382	1.512
Nd	3.714	3.965	9.461	—	2.20	—	2.51	3.930	1.878	7.066
Sm	1.259	1.302	2.830	—	0.80	—	1.01	1.229	0.698	1.953
Eu	0.440	0.448	1.103	—	0.53	—	0.41	0.448	0.256	0.545
Gd	1.573	1.751	3.419	—	1.10	—	1.5	1.555	1.004	2.220
Tb	0.265	0.315	0.555	—	0.21	—	0.31	0.270	0.182	0.368
Dy	1.754	2.139	3.570	—	1.35	—	1.98	1.798	1.236	2.435
Ho	0.377	0.488	0.780	—	0.31	—	0.49	0.408	0.279	0.528
Er	1.129	1.506	2.291	—	0.84	—	1.34	1.276	0.899	1.605
Tm	0.164	0.222	0.327	—	0.13	—	0.22	0.182	0.129	0.228
Yb	1.056	1.453	2.101	—	0.76	—	1.35	1.168	0.834	1.480
Lu	0.154	0.226	0.312	—	0.12	—	0.23	0.178	0.129	0.227
Hf	0.755	0.888	1.298	—	0.37	—	0.66	0.739	0.477	1.175
Ta	0.070	0.074	0.213	—	0.06	—	0.04	0.050	0.286	0.146
W	0.257	0.372	0.704	—	1.27	—	1.0	0.312	0.827	0.353
Re	H.o.	H.o.	H.o.	—	H.o.	—	H.o.	H.o.	H.o.	H.o.
Au	H.o.	H.o.	H.o.	—	0.03	—	0.01	H.o.	H.o.	0.024
Tl	0.016	0.007	0.005	—	0.04	—	H.o.	0.002	0.003	0.002
Pb	0.676	1.545	0.905	—	23.11	—	2.78	1.597	0.949	1.681
Bi	0.010	0.031	0.014	—	0.02	—	0.04	0.014	0.004	0.011
Th	0.161	0.333	0.650	—	0.10	—	0.18	0.357	0.176	0.571
U	0.206	0.325	0.293	—	0.20	—	0.18	0.215	0.167	0.226

Примечание. H1–H5 – плагиофировые базальты второй толщ, H6–H10 – пироксен-плагиоклазовые (H6–H9) и плагиофировые (H10) базальты третьей толщ, H11–H13 – габбро, H14–H20 – долерит-порфириты и габбро-диорит-порфириты.

Note. H1–H5 – plagiophyre basalts of the second deposit, H6–H10 – pyroxene-plagiophyre (H6–H9) and plagiophyre (H10) basalts of the third deposit, H11–H13 – gabbro, H14–H20 – dolerite-porphyrates and gabbro-diorite-porphyrates.



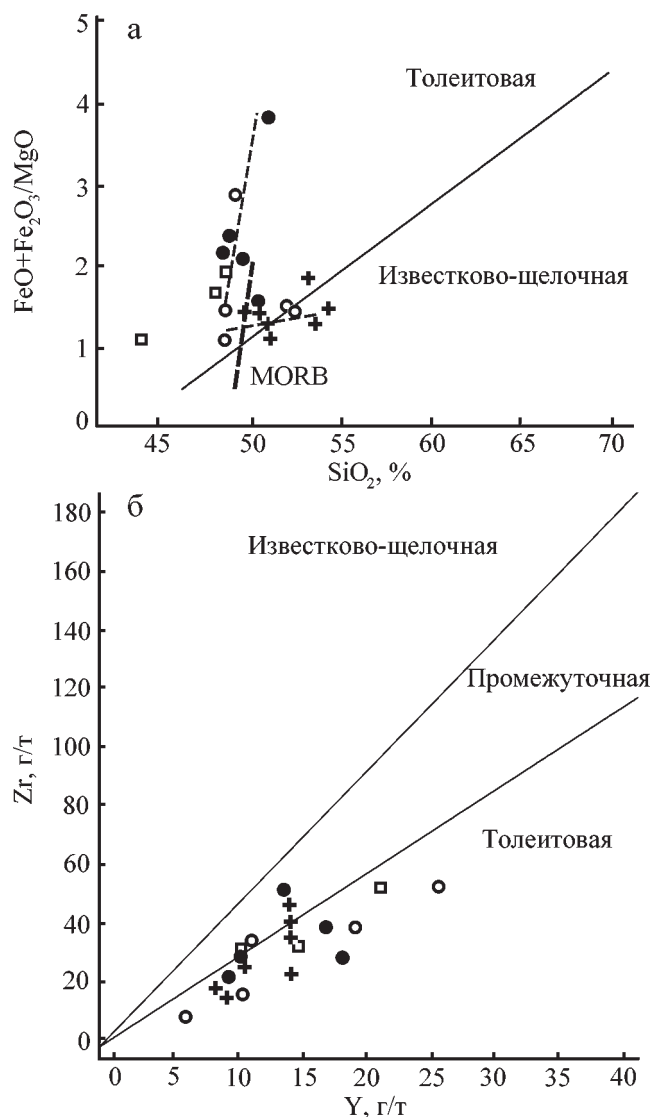
**Fig. 2.** Diagrams  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$  (a),  $\text{Na}_2\text{O--CaO}$  (б) и  $\text{Zr/Ti--Nb/Y}$  [Pearce, 1996] (в) for effusive and intrusive rocks of the Nikolaevka deposit.

типах пород (рис. 2б). На диаграмме соотношений малоподвижных высокозарядных элементов  $Zr/Ti-Nb/Y$  фигуративные точки состава пород ложатся в поле базальтов базальт-андезит-дацит-риолитовой серии (рис. 2в). Эти данные позволяют нам относить базальты и интрузивные образования месторождения к породам нормального ряда.

Плагιοфировые базальты второй и третьей толщ по петрографическому и химическому составу близки между собой. Это хорошо раскристаллизованные мелко-среднепорфировые породы с диабазовой или толеитовой структурой основной массы. Содержания  $\text{SiO}_2$  варьируют в них в интервале от 48.50 до 51.00,  $\text{K}_2\text{O}$  – от 0.3 до 1.0%. Базальты представляют собой высокожелезистые ( $\Sigma(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) = 12.0\text{--}14.57\%$ ), умеренно- и низкоглиноземистые ( $\text{al}' = 0.65\text{--}0.97$ ), умереннотитанистые ( $\text{TiO}_2 = 0.94\text{--}1.60\%$ ) образования с невысокими содержаниями  $\text{MgO}$  (3.40–7.80%), которые принадлежат к толеитовой петрохимической серии. На диаграмме  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})/\text{MgO}\text{--}\text{SiO}_2$  плагιοфировые базальты обнаруживают тренд, близкий к тренду MORB, по А. Миаширо [Miyashiro, 1973] (рис. 3а). По соотношениям  $\text{Zr}$  и  $\text{Y}$  (рис. 3б), элементов мало-подвижных при вторичных изменениях они также соответствуют толеитовым образованиям. Исключение составляют базальты с повышенным содержанием  $\text{Ti}$  (проба Н-5), имеющие переходный от толеитового к известково-щелочному состав.

Тренды распределения редких элементов на спайдерграммах (рис. 4а) характеризуются наличием отрицательных аномалий Nb и Zr, что отличает надсубдукционные образования. В то же время здесь проявлены не свойственные для островодужных пород положительные аномалии Ti. Спектры распределения РЗЭ в плагиофировых базальтах представлены двумя типами (рис. 4г). Первый из них выделяется незначительным накоплением легких лантаноидов ( $(La/Yb)_N = 1.937$ ). Он характерен для базальтов с повышенными содержаниями  $TiO_2$ . Второй имеет субхондритовое распределение редких земель ( $(La/Yb)_N = 0.996\text{--}1.019$ ). На диаграмме Zr/Nb–Nb/Th точки составов плагиофировых базальтов располагаются в поле островодужных пород основного состава (рис. 5).

Пироксен-плагиоклазовые базальты третьей толщи представляют собой среднепорфировые миндалекаменные породы со стекловатой интерсертальной, иногда гиалопилитовой структурой основной массы. Содержания  $\text{SiO}_2$  составляют в них 48.40–52.40,  $\text{K}_2\text{O}$  – 0.1–0.25%. По сравнению с плагиоклазовыми базальтами они характеризуются более низкими содержаниями Fe ( $\Sigma(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) = 9.45\text{--}12.17\%$ ), Ti ( $\text{TiO}_2 = 0.33\text{--}0.55\%$ ) и повышенной магнезиальностью ( $\text{MgO} = 5.0\text{--}10.0\%$ ). По значениям коэффициента  $\text{al}'$  (0.69–0.95) также относятся к умеренно-, низкоглиноземистым образованиям. На диаграмме Миаширо базальты с



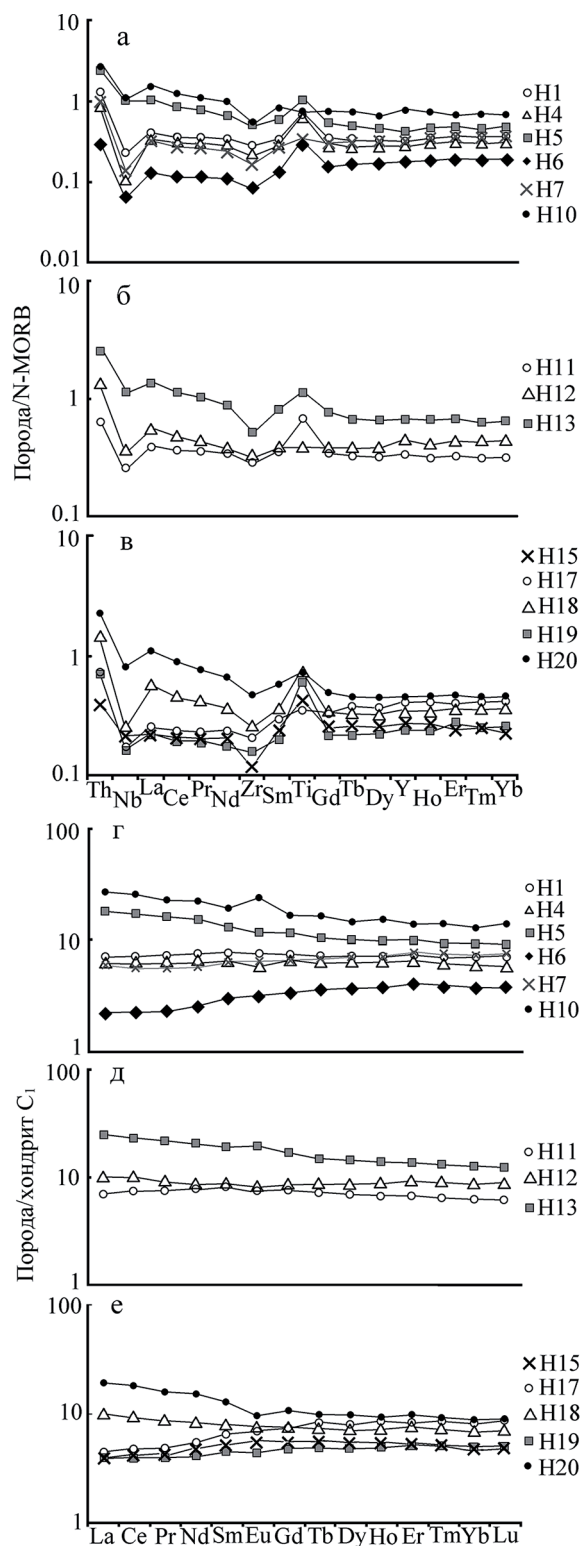
**Рис. 3.** Диаграмма  $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{MgO}-\text{SiO}_2$  для эффузивных и интрузивных пород Николаевского месторождения.

Условные обозначения – см. рис. 2. Тонкими пунктирными линиями показаны тренды составов пород Николаевского месторождения, толстой – MORB по А. Миаширо [Miyashiro, 1973].

**Fig. 3.** Diagram  $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{MgO}-\text{SiO}_2$  for effusive and intrusive rocks of the Nikolaevskoe deposit.

For a legend see Fig. 2. Thin dashed lines show the trends in the composition of the rocks of the Nikolaevsky deposit; thick one is MORB by A. Miyashiro [Miyashiro, 1973].

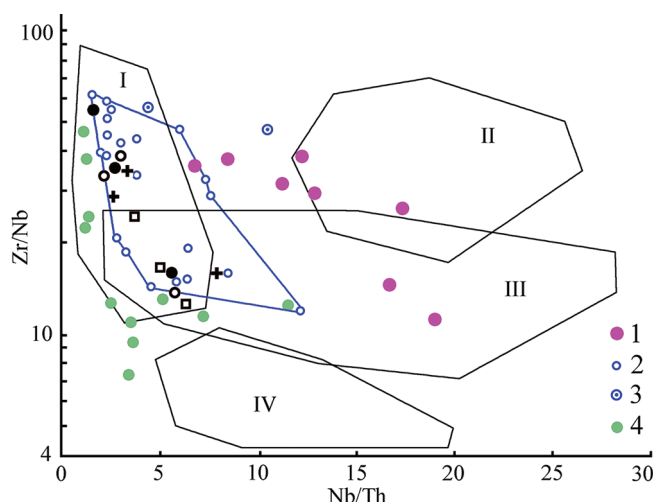
содержанием  $\text{SiO}_2$  менее 52% попадают в область толейтовых пород (см. рис. 3а). Дифференциаты с более высокими концентрациями кремнезема имеют известково-щелочной состав. Однако по соотношениям  $\text{Zr}$  и  $\text{Y}$  они принадлежат к породам толейтового и переходного к известково-щелочному состава (см. рис. 3б). Тренды распределения мало-



**Рис. 4.** Тренды распределения редких и редко-земельных элементов в базальтах (а, г), в габбро (б, д) и долерит-порфиритах и габбро-диорит-порфиритах (в, е).

**Fig. 4.** Trends in the distribution of rare and rare-earth elements in basalts (a, g), gabbro (б, д) and dolerite-porphyrites and gabbro-diorite-porphyrites (в, е).





**Рис. 5.** Диаграмма Zr/Nb–Nb/Th [Condie, 2005] для пород базальтового состава.

1 – поляковская свита ( $O_2$ ), 2 – баймак-бурибаевская свита ( $D_{1e2}$ ), 3 – киёмбаевский и акжарский комплексы ( $D_{1e2}$ ), 4 – иредыкская свита ( $D_2$ ) [Spadea et al., 2002; Косарев и др., 2003, 2005; Косарев, 2007, 2015; Nimis et al., 2010; Знаменский, Мичурин, 2013]. Остальные условные обозначения – см. рис. 2. Сплошными линиями оговорены поля составов базальтов: I – островных дуг, II – COX, III – океанических плато, IV – океанических островов.

**Fig. 5.** Diagram Zr/Nb–Nb/Th [Condie, 2005] for basaltic rocks.

1 – Polyakovka Formation ( $O_2$ ), 2 – Baymak-Buribay Formation ( $D_{1e2}$ ), 3 – Kiembay and Akzhar complexes ( $D_{1e2}$ ), 4 – Iredyk Formation ( $D_2$ ) [Spadea et al., 2002; Kosarev i dr., 2003, 2005; Kosarev, 2007, 2015; Nimis et al., 2010; Znamenskii, Michurin, 2013]. For the revaining legend see Fig. 2. The solid lines show the fields of basalt compositions: I – island arcs, II – MORB, III – oceanic floor, IV – oceanic island.

подвижных редких элементов совпадают с трендами распределения этих элементов в плагиофировых базальтах (см. рис. 4а). Спектры распределения РЗЭ незначительно обогащены тяжелыми лантаноидами ( $(La/Yb)_N = 0.61–0.82$ ) (см. рис. 4г). На диаграмме Zr/Nb–Nb/Th также отчетливо проявлена принадлежность пироксен-плагиоклазовых базальтов к островодужным образованиям (см. рис. 5).

Интрузивные габбро, состоящие в основном из плагиоклаза и, как правило, хорошо сохранившегося моноклинного пироксена, представляют собой массивные средне-крупнокристаллические образования с аллотриоморфнозернистой структурой. Содержания  $SiO_2$  варьируют здесь в интервале от 44.00 до 48.40,  $K_2O$  – от 0.25 до 0.30%. По значениям коэффициентов  $al^*$  (0.69–0.96) они относятся к умеренно-, низкоглиноземистым разностям. На диаграммах  $(Fe_2O_3 + FeO)/MgO-SiO_2$  и Zr/Y фигуративные точки составов габбро располагаются в области толеитовых пород (см. рис. 3). Среди габбро

выделяются две разновидности, различающиеся по содержаниям железа и титана: высокожелезистые ( $\Sigma(Fe_2O_3 + FeO) = 14.39\%$ ) – умереннотитанистые ( $TiO_2 = 1.71\%$ ) и умеренножелезистые ( $\Sigma(Fe_2O_3 + FeO) = 10.15–10.69\%$ ) – умеренно-, низкотитанистые ( $TiO_2 = 0.60–1.07\%$ ). По большинству петрогеохимических параметров (см. табл. 1, рис. 2, 3), содержанию и спектрам распределения редких и редкоземельных элементов (см. рис. 4б, д; рис. 5) первые из них идентичны плагиофировым базальтам, а вторые – пироксен-плагиоклазовым.

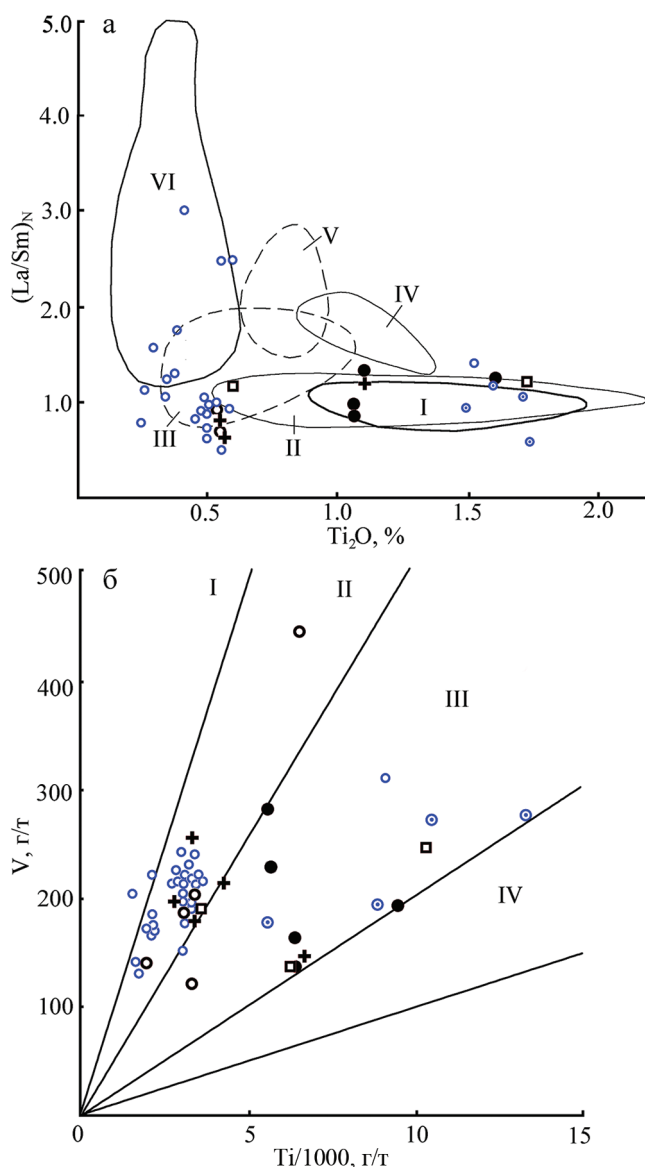
Долерит-порфиры ( $SiO_2 = 50.00–51.00\%$ ) и габбро-диорит-порфиры ( $SiO_2 = 53.00–54.00\%$ ) рудоносной серии состоят главным образом из альбитизированного плагиоклаза и пироксена, который в большинстве случаев хлоритизирован. Для этих пород характерны порфировые или гломеро-порфировые выделения плагиоклаза размером до 3–4 мм и габбро-диабазовая структура основной массы. Пироксен в габбро-диорит-порфиритах, по сравнению с долерит-порфиритами, содержится в меньших количествах, что находит отражение в содержаниях  $Al_2O_3$ : в габбро-диорит-порфиритах – 17.00–17.68, в долерит-порфиритах – 14.60–15.10%. Габбро-диорит-порфиры при примерно одинаковой магнезиальности отличаются от долерит-порфиритов повышенными содержаниями  $TiO_2$  (до 1.10%). Концентрации  $K_2O$  в породах обоих типов невысокие – 0.10–0.50%. На диаграмме Миаширо точки составов порфировых интрузивных образований располагаются вдоль тренда пироксен-плагиоклазовых базальтов (см. рис. 3а). При содержаниях  $SiO_2 = 51.00\%$  и выше толеитовые разновидности начинают сменяться породами известково-щелочного состава. Между тем на диаграмме Zr–Y они попадают в область пород толеитового и переходного к известково-щелочному состава (см. рис. 3б). Тренды распределения редких элементов на спайдерграммах в долерит-порфиритах и габбро-диорит-порфиритах имеют те же особенности, что и в базальтах и габбро: отрицательные аномалии Nb и Zr и положительные Ti; близкими являются также спектры распределения редкоземельных элементов (см. рис. 4). На диаграмме Zr/Nb–Nb/Th точки составов долерит-порфиритов, габбро и базальтов месторождения образуют единый ореол, располагающийся в поле островодужных базальтов (см. рис. 5).

Таким образом, по индикаторным петрогеохимическим параметрам интрузивные породы Николаевского месторождения близки к вмещающим базальтам, что позволяет рассматривать их в качестве комагматичных образований и объединять в вулcano-интрузивный комплекс. Судя по соотношениям малоподвижных при вторичных изменениях редких элементов, породы комплекса имеют нормальную щелочность и толеитовый и переходный к известково-щелочному состав. Среди фа-

унистически датированных вулканогенных комплексов, распространенных в зоне ГУР на северном окончании Магнитогорской мегазоны [Маслов, Артюшкова, 2010], по химическому составу рудовмещающие породы Николаевского месторождения наиболее близки к вулканитам баймак-бурибаевской свиты ( $D_{1e_2}$ ). Это наглядно иллюстрирует диаграмма  $Zr/Nb-Nb/Th$  (см. рис. 5). Баймак-бурибаевская свита занимает самое низкое положение в разрезе девонских островодужных толщ и знаменует начальный этап образования энсиматической островной дуги [Серавкин и др., 1992]. Геохимические данные, по нашему мнению, позволяют рассматривать золотоносный вулкан-интрузивный комплекс в качестве возрастного аналога баймак-бурибаевской свиты. Вместе с тем породы комплекса обладают и рядом отличительных особенностей, которые, по-видимому, в значительной мере обусловлены особенностями геодинамической обстановки их формирования.

Состав и геохимия баймак-бурибаевских вулканитов детально изучены главным образом в южных колчеданосных районах Магнитогорской мегазоны [Spadea et al., 2002; Косарев и др., 2005; Niimi et al., 2010; и др.]. Свита состоит здесь из двух комплексов: нижнего – баймак-бурибаевского контрастного риолит-базальтового (с толщей магнезиальных толеитов и бонинитов в основании) – и верхнего – верхнетаналыкского непрерывного базальт-андезит-дацит-риолитового. Вулкан-интрузивная ассоциация Николаевского месторождения отличается от этих комплексов общей повышенной железистостью и титанистостью при пониженной магнезиальности всех разновидностей пород, а также отсутствием бонинитов и кремнекислых вулканитов, с преобладанием порфировых типов пород.

О геодинамической обстановке формирования рудовмещающих пород Николаевского месторождения позволяют также судить данные, приведенные на диаграммах  $(La/Sm)_N-TiO_2$  и  $V-Ti/1000$  (рис. 6). На первой из них точки составов плагиофировых базальтов и габбро с повышенными содержаниями  $Ti$  располагаются в поле базальтов задуговых бассейнов и N-MORB (см. рис. 6а), а на второй – в поле базальтов дистальных (удаленных от зон субдукции) островных дуг и задуговых бассейнов и N-MORB (см. рис. 6б). При этом на обеих диаграммах они занимают промежуточное положение между низкотитанистыми островодужными базальтами баймак-бурибаевской свиты и высоко-, умереннотитанистыми основными вулканитами колчеданосных киембаевского и акжарского комплексов, которые являются возрастными аналогами этой свиты, сформировавшимися в геодинамической обстановке задугового бассейна [Косарев, 2007]. Пироксен-плагиофировые базальты, низкотитанистые габбро и долерит-порфириты на диаграмме  $(La/Sm)_N-TiO_2$  попадают в поле остро-



**Рис. 6.** Диаграммы  $(La/Sm)_N-TiO_2$  [Khanna, 2013] (а) и  $V-Ti/1000$  [Pearce, 2014] (б) для основных пород.

а. Поля составов базальтов COX (I), моря Лау (II), Тонго-Кермадек (III) и Марианской (IV) островных дуг, Марианского желоба (V) и фанерозойских бонинитов (VI).

б. Поля составов: I – бонинитов; II – базальтов проксимальных островных дуг и задуговых бассейнов; III – базальтов дистальных островных дуг, задуговых бассейнов и COX.

Условные обозначения – см. рис. 2 и 5.

**Fig. 6.** Diagrams  $(La/Sm)_N-TiO_2$  [Khanna, 2013] (a) и  $V-Ti/1000$  [Pearce, 2014] (b) for basaltic rocks.

а. Fields of basalt compositions MORB (I), Lau basin (II), Tonga-Kermadec (III) and Mariana (IV) island arcs, Mariana Trough (V) and Phanerozoic boninites.

б. Fields of composition: I – boninites, II – basalts of proximal island arcs, III – basalts of distal island arcs, back arc basins and MORB.

For a legend see Fig. 2 and 5.

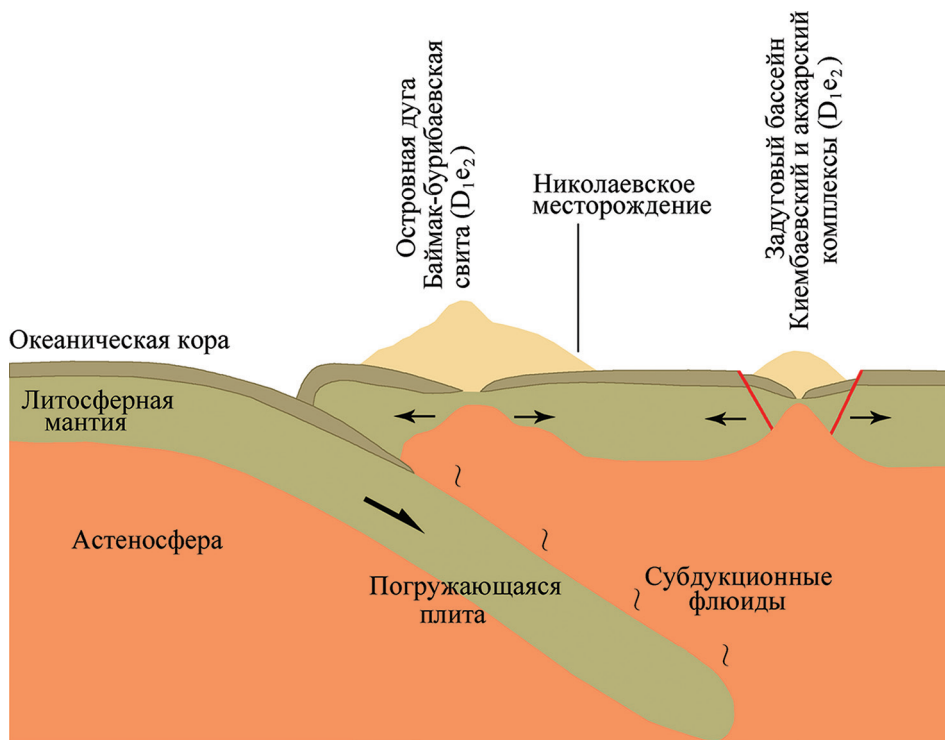
водужных базальтов (см. рис. 6а), а на диаграмме  $V-Ti/1000$  – в поле основных пород проксимальных островных дуг и задуговых бассейнов (см. рис. 6б). Таким образом, умереннотитанистые толеиты, обладающие чертами базальтов дистальных задуговых бассейнов и N-MORB, сменяются вверх по разрезу низкотитанистыми и более магнезиальными базальтами толеитового и переходного к известково-щелочному состава. По геохимическим признакам они сопоставимы с проксимальными островодужными вулканитами. В целом аналогичную эволюцию претерпели и составы интрузивных пород.

Одним из факторов, определяющих концентрации  $Ti$  в надсубдукционных вулканитах, является степень частичного плавления мантийного субстрата, на которую, в свою очередь, существенное влияние оказывает количество водонасыщенного субдукционного флюида, поступившего в область магмаобразования [Pearce, 2014]. Увеличение количества воды приводит к повышению степени плавления субстрата и падению в расплаве концентраций  $Ti$ , как известно относящегося к инертным элементам. Согласно расчетам К.А. Kelley с соавторами [2006], добавление в мантию 0.2% воды вызывает повышение степени ее плавления на 10% и приблизительно двойное падение содержания  $Ti$  в расплаве. Существенное значение имеют также повышенные концентрации в водонасыщенном субдукционном флюиде хлора и сульфатной серы. Наличие именно этих агрессивных элементов-минерализаторов в составе магматогенного флюида, экстрагирующего из расплавов и вмещающих вулканогенных толщ хлорофильные и сульфурфильные рудные компоненты (Au, Cu, Fe и др.), оказывает существенное влияние на формирование золото-порфирового и золото-медно-порфирового оруденения [Холоднов, Бушляков, 2002; Холоднов и др., 2016]. Изучение особенностей распределения галогенов (Cl, F) и  $SO_3$  в апатитах Вознесенского месторождения и Кутуевского рудопроявления, которые, как и близкое им по возрасту Николаевское золото-порфировое месторождение на севере Магнитогорского мегасинклинория, приурочены к зоне ГУР, показало, что эти особенности могут быть признаком проявления жидкостной несмесимости (гетерогенизации) в составах сверхкритических хлоридно-сульфатных флюидов: с образованием фракции флюида, богатой хлором, но бедной фтором и сульфатной серой, и фракции, обогащенной сульфатной серой и фтором – при более низком содержании хлора [Холоднов и др., 2016]. Это наиболее характерно для тех случаев, когда кристаллизация рудоносных расплавов происходит в условиях резко неравновесной физико-химической обстановки. На основании этих исследований был сделан вывод о том, что порфировые рудно-магматические системы (РМС) могут одно-

временно генерировать флюиды, характеризующиеся различной металлогенической специализацией, при участии которых формируются как магматогенные медно-порфировые, так и ассоциирующие с ними золоторудные эпitherмальные месторождения. Экспериментальные исследования поведения рудных элементов в гетерофазных хлоридных и карбонатно-хлоридно-сульфатных окисленных магматических флюидах позволяют более детально оценить возможные условия генерации рудообразующих флюидов на различных уровнях формирования порфировых РМС. Снижение давления, как свидетельствуют эксперименты [Боровиков и др., 2015], приводят к перераспределению одних рудных элементов (Cu, Fe, Mo, Zn, Sb и др.) в пользу хлоридной фазы, а других (Au и др.) – в пользу карбонатно-сульфатной фазы, образующейся в процессе гетерогенизации первичного флюида.

В настоящее время достаточно надежно установлено, что с заложением Магнитогорской островной дуги связаны условия растяжения, обусловившие локальный рифтогенез и подъем мантийного диапира над зоной субдукции, имевшей восточное падение [Серавкин и др., 1992; Косарев и др., 2005; Пучков, 2010]. В этот период в высокотемпературной зоне мантийного клина, обогащенной субдукционными флюидами, выплавлялись бониниты баймак-бурибаевской свиты, а в более низкотемпературной области генерировались магнезиальные низкотитанистые магмы толеитового и переходного к известково-щелочному состава. В дальнейшем, в условиях относительного сжатия, сменившего режим растяжения, образовались дифференцированные вулканиты верхов баймак-бурибаевского и верхнетаналыкского комплексов. Параллельно в дистальном задуговом бассейне, возникшем в процессе спрединга морского дна (при внедрении мантийного диапира), формировались высоко-, умереннотитанистые вулканиты киембаевского и акжарского комплексов. Генерация магмы, исходной для этих комплексов, происходила без участия субдукционных флюидов [Косарев, 2007], что может быть объяснено расположением области плавления мантийного диапира на значительном удалении от зоны субдукции (рис. 7). По сравнению с этой областью зона, в которой выплавлялась магма, исходная для вулкано-интрузивного комплекса Николаевского месторождения, по-видимому, находилась ближе к субдуцирующей плите и поэтому в расплавы могли вовлекаться водонасыщенные субдукционные флюиды, что в конечном счете отразилось на уменьшении в нем концентраций  $Ti$ . Преобладание в составе комплекса порфировых разновидностей пород указывает на геодинамические условия относительного сжатия при их формировании. По нашему мнению, такие условия могли существовать в зоне, разделявшей островную дугу и задуговый бассейн: вначале в связи с процессами





**Рис. 7.** Предполагаемая геодинамическая позиция Николаевского месторождения. Стрелками показаны области растяжения (для островной дуги на начальных этапах ее развития).

**Fig. 7.** The proposed geodynamic position of the Nikolaevskoe deposit. The arrows indicate the stretching regions (for the island arc at the initial stages of its development).

растяжения в этих структурах, а впоследствии из-за общего относительного сжатия островодужной системы (см. рис. 7). Этот вывод согласуется с приведенными выше результатами геодинамического анализа геохимических данных.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Золото-порфировое оруденение Николаевского месторождения ассоциирует с островодужным вулкано-интрузивным комплексом, объединяющим базальты, их туфы, интрузии габбро и золотоконтролирующие дайки долерит-порфиринов и габбро-диорит-порфиринов. По химическому составу породы комплекса наиболее близки к вулканитам баймак-бурибаевской свиты ( $D_{1e2}$ ) и рассматриваются нами в качестве их возможного возрастного аналога. Золотоконтролирующие порфировые породы относятся к нормальному ряду и в отличие от большинства островодужных интрузий медно-порфировых месторождений Южного Урала, принадлежащих к известково-щелочной серии, имеют толеитовый и переходный от толеитового к известково-щелочному состав. К числу их геохимических особенностей относятся также повышенные содержания Ti, что, по-видимому, в значительной мере обусловлено особенностями гео-

динамической обстановки формирования вулкано-интрузивного комплекса. Наиболее обоснованной представляется геодинамическая позиция Николаевского золото-порфирового месторождения в зоне сопряжения островной дуги и задугового бассейна.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и АН РБ, грант № 17-45-020717 и частичного финансирования в рамках темы 0393-0018 государственного задания ИГТ УрО РАН.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белгородский Е.А., Шалагинов А.Э. (1999) Проблема золотопорфирового оруденения в Миасском районе. *Урал. геол. журн.*, (3), 97-100.
- Бердников П.Г. (1986) Золотооруденение Учалинского и Белорецкого рудных районов на Южном Урале. Автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. Свердловск: ИГТ УНЦ АН СССР, 17 с.
- Боровиков А.А., Бульбак Т.А., Борисенко А.С., Рагозин А.Л., Палесский С.В. (2015) Поведение рудных элементов в окисленных хлоридных и карбонатно-хлоридно-сульфатных гетерофазных флюидах Cu-Mo(Au)-порфировых месторождений (по экспериментальным данным). *Геол. и геофиз.*, **56**(3), 557-570.
- Грабежев А.И. (2012) Рениеносные медно-порфировые системы Урала: геологическое положение, изотопно-



- петрогеохимическая и возрастная латеральная зональность. *Литосфера*, (4), 190-207.
- Грабежев А.И. (2014) Юбилейное Cu-Au-порфировое месторождение (Южный Урал, Россия): SHRIMP-II U-Pb возраст циркона и изотопно-геохимические особенности рудоносных гранитоидов. *Докл. АН*, **454**(3), 315-318.
- Грабежев А.И., Белгородский Е.А. (1992) Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфировых месторождений. Екатеринбург: Наука, Урал. отд-е, 199 с.
- Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю., Артемьев Д.А., Юминов А.М., Симонов В.А., Дунаев А.Ю. (2009) Геология и колчеданное оруденение южного фланга Главного Уральского разлома. Миасс: ИМин УрО РАН, 376 с.
- Знаменский С.Е. (2009) Структурные условия формирования коллизионных месторождений золота восточного склона Южного Урала. Уфа: Гилем, 348 с.
- Знаменский С.Е., Мичурин С.В. (2013) Условия образования золото-сульфидного месторождения Миндяк (Южный Урал): структурные и изотопно-геохимические аспекты. *Литосфера*, (4), 121-135.
- Знаменский С.Е., Пучков В.Н., Мичурин С.В. (2015) Источники рудообразующих флюидов и условия формирования орогенных месторождений золота зоны Главного Уральского разлома на Южном Урале. *Докл. АН*, **464**(3), 313-316.
- Контарь Е.С. (2013) Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 199 с.
- Косарев А.М. (2007) Умереннощелочной и щелочной вулканизм раннеэмского времени на Южном Урале: геохимические особенности и геодинамические реконструкции. *Литосфера*, (6), 54-70.
- Косарев А.М. (2015) Геология и геохимические особенности раннепалеозойских вулканитов Сакмарской и Вознесенско-Присакмарской зон на Южном Урале. *Литосфера*, (2), 40-64.
- Косарев А.М., Знаменский С.Е., Серавкин И.Б., Родичева З.И. (2003) Особенности химизма вулканитов Вознесенско-Присакмарской зоны. *Геол. сб.*, (3), ИГ УНЦ РАН. Уфа, 152-161.
- Косарев А.М., Пучков В.Н., Ронкин Ю.Л., Серавкин И.Б., Холоднов В.В., Грабежев А.И. (2014) Новые данные о возрасте и геодинамической позиции медно-порфировых проявлений зоны Главного Уральского разлома на Южном Урале. *Докл. АН*, **459**(1), 62-66.
- Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б. (2005) Петролого-геохимические особенности раннедевонско-эфельских островодужных вулканитов Магнитогорской зоны в геодинамическом аспекте. *Литосфера*, (4), 22-41.
- Кривцов А.И. (1983) Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. М.: Недра, 256 с.
- Мансуров Р.Х. (2016) Строение минерализованных зон Петропавловского золото-порфирового месторождения (Полярный Урал). *Вестн. Перм. ун-та. Геол.*, **33**(4), 49-69.
- Маслов В.А., Артюшкова О.В. (2010) Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 288 с.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Серавкин И.Б., Косарев А.М., Салихов Д.Н., Знаменский С.Е., Родичева З.И., Рыкус М.В., Сначев В.И. (1992) Вулканизм Южного Урала. М.: Наука, 197 с.
- Холоднов В.В., Бушляков И.Н. (2002) Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 390 с.
- Холоднов В.В., Серавкин И.Б., Косарев А.М., Коновалова Е.В., Шагалов Е.С. (2016) Распределение галогенов и серы в апатитах медно-порфировых месторождений Южного Урала (новые данные). *Минералогия*, (1), 54-65.
- Condie K.C. (2005) TTGs and adakites: are they both slab melts? *Lithos*, **83**, 33-44.
- Kelley K.A., Plank T., Grove T.L., Stolper E.M., Newman S., Hauri E. (2006) Mantle melting as a function of water content beneath back-arc basins. *J. Geophys. Res.*, **111**, 1-27.
- Khanna T.C. (2013) Geochemical evidence for a paired arc-back-arc association in the Neoproterozoic Gadwal greenstone belt, eastern Dharwar craton, India. *Curr. Sci.*, **104**(5), 632-640.
- Miyashiro A. (1973) The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**, 218-224.
- Nimis P., Omenetto P., Buschmann B., Jonas P., Simonov V.A. (2010) Geochemistry of igneous rocks associated with ultramafic-mafic-hosted Cu (Co, Ni, Au) VMS deposits from the Main Uralian Fault (Southern Urals, Russia). *Mineral. Petrol.*, **100**, 201-214.
- Pearce J.A. (1996) A user's guide to basalt discrimination diagrams. *Geol. Assoc. Can. Spec. Publ.*, **12**, 79-113.
- Pearce J.A. (2014) Immobile Element Fingerprinting of Ophiolites. *Elements*, **10**, 101-108.
- Plotinskaya O.Yu., Grabezhev A.I., Tessalina S., Seltmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: Geological framework and metallogeny. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 153-173.
- Spadea P., D'Antonio M., Kosarev A., Gorozhanina Ye., Brown D. (2002) Arc-continent collision in the Southern Urals: Petrogenetic aspects of the Forearc-arc Complex. Mountain Building in the Uralides: Pangea to the Present. *Geophys. Monogr.*, **132**, 101-134.

## REFERENCES

- Condie K.C. (2005) TTGs and adakites: are they both slab melts? *Lithos*, **83**, 33-44.
- Grabezhev A.I. (2012) Rhenium-bearing Uralian porphyry-copper systems: geological position, isotope-petrogeochemical and spatial-timing lateral zoning. *Litosfera*, (4), 190-207. (In Russian)
- Grabezhev A.I. (2014) Yubileinoe Cu-Au-porphyry deposit (the Southern Urals, Russia): SHRIMP-II U-Pb age of zircon and isotopic-geochemical peculiarities ore-bearing granitoids. *Dokl. Akad. Nauk*, **454**(3), 315-318. (In Russian)
- Grabezhev A.I., Belgorodskii E.A. (1992) *Produktivnye granitoidy i metasomatity medno-porfirovyykh mestorozhdenii* [Ore-Bearing Granitoids and Metasomatites of Copper Porphyry Deposits]. Ekaterinburg, Ural section Nauka Publ., 199 p. (In Russian)
- Holodnov V.V., Bushlyakov I.N. (2002) *Galogeny v endogenom rudoobrazovanii* [Halogen in endogenous ore formation]. Ekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 390 p. (In Russian)
- Holodnov V.V., Seravkin I.B., Kosarev A.M., Konovalova E.V., Shagalov E.S. (2016) Distribution of halogens and sulfur in apatites of copper-porphyry deposits in the South Urals (new data). *Mineralogiya*, (1), 54-65. (In Russian)
- Kelley K.A., Plank T., Grove T.L., Stolper E.M., Newman S., Hauri E. (2006) Mantle melting as a function of water content beneath back-arc basins. *J. Geophys. Res.*, **111**, 1-27.
- Khanna T.C. (2013) Geochemical evidence for a paired arc-back-arc association in the Neoproterozoic Gadwal greenstone belt, eastern Dharwar craton, India. *Curr. Sci.*, **104**(5), 632-640.
- Kontar' E.S. (2013) *Geologo-promyshlennyye tipy mestorozhdenii medi, tsinka, svintsa na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy)* [The Geological-industrial types of the Cu, Zn, Pb deposits in the Urals (geological conditions of setting, history of the formation, the prospects)]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 199 p. (In Russian)
- Kosarev A.M. (2007) Subalkaline volcanism of the Lower Emsian of the Southern Urals: geochemical peculiarities and geodynamic reconstructions. *Litosfera*, (6), 54-70. (In Russian)
- Kosarev A.M. (2015) Geology and geochemical features of Early Paleozoic volcanites Sakmara and Voznesenka-Prisakmara zones in Southern Urals. *Litosfera*, (2), 40-64. (In Russian)
- Kosarev A.M., Znamensky S.E., Seravkin I.B., Rodicheva Z.I. (2003) Peculiarities of the chemism of volcanics of the Voznesensk-Prisakmar zone. *Geologicheskii sbornik*, (3), IG UNC RAN. Ufa, 152-161. (In Russian)
- Kosarev A.M., Puchkov V.N., Ronkin Yu.L., Seravkin I.B., Holodnov V.V., Grabezhev A.I. (2014) New data on the age and geodynamic position copper-porphyry mineralization in the Main Uralian Fault (South Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **459**(1), 62-66. (In Russian)
- Kosarev A.M., Puchkov V.N., Seravkin I.B. (2005) Petrological-geochemical features of the Early Devonian-Eifelian island-arc volcanics of the Magnitogorsk zone in a geodynamic context. *Litosfera*, (4), 22-41. (In Russian)
- Krivtsov A.I. (1983) *Geologicheskie osnovy prognozirovaniya i poiskov medno-porfirovyykh mestorozhdenii* [Geological basis for forecasting and searching for copper-porphyry deposits]. Moscow, Nedra Publ., 256 p. (In Russian)
- Mansurov R.H. (2016) The structure of the mineralized zones of the Petropavlovsk gold-porphyry deposit (the Polar Urals). *Vestnik Permskogo Universiteta. Geologiya*, **33**(4), 49-69. (In Russian)
- Maslov V.A., Artyushkova O.V. (2010) *Stratigrafiya i korrelyatsiya devonskikh otlozhenii Magnitogorskoj megazonny Yuzhnogo Urala* [Stratigraphy and correlation of the Devonian deposits of the Magnitogorsk Megazone of the Southern Urals]. Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 288 p. (In Russian)
- Miyashiro A. (1973) The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**, 218-224.
- Nimis P., Omenetto P., Buschmann B., Jonas P., Simonov V.A. (2010) Geochemistry of igneous rocks associated with ultramafic-mafic-hosted Cu (Co, Ni, Au) VMS deposits from the Main Uralian Fault (Southern Urals, Russia). *Miner. Petrol.*, **100**, 201-214.
- Puchkov V.N. (2010) *Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of the Urals and Cis-Urals (actual problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 280 p. (In Russian)
- Seravkin I.B., Kosarev A.M., Salikhov D.N., Znamenskii S.E., Rodicheva Z.I., Rykus M.V., Snachev V.I. (1992) *Vulkanizm Yuzhnogo Urala* [Volcanism of the Southern Urals]. Moscow, Nauka Publ., 197 p. (In Russian)
- Pearce J.A. (1996) A user's guide to basalt discrimination diagrams. *Geol. Assoc. Can. Spec. Publ.*, **12**, 79-113.
- Pearce J.A. (2014) Immobile Element Fingerprinting of Ophiolites. *Elements*, **10**, 101-108.
- Plotinskaya O.Yu., Grabezhev A.I., Tessalina S., Seltmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: Geological framework and metallogeny. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 153-173.
- Spadea P., D'Antonio M., Kosarev A., Gorozhanina Ye., Brown D. (2002) Arc-continent collision in the Southern Urals: Petrogenetic aspects of the Forearc-arc Complex. Mountain Building in the Uralides: Pangea to the Present. *Geophys. Monogr.*, **132**, 101-134.
- Zaikov V.V., Melekestseva I.Yu., Artem'ev D.A., Yuminov A.M., Simonov V.A., Dunaev A.Yu. (2009) *Geologiya i kolchedannoe orudenenie yuzhnogo flanga Glavnogo Ural'skogo razloma* [Geology and massive sulfide mineralization of the southern flank of the Main Ural Fault]. Miass, IMin UrO RAN Publ., 376 p. (In Russian)
- Znamensky S.E. (2009) *Strukturnyye usloviya formirovaniya kollizionnykh mestorozhdenii zolota vostochnogo sklona Yuzhnogo Urala* [Structural conditions of the formation of collisional gold deposits of the eastern slope of the Southern Urals]. Ufa, Gilem Publ., 348 p. (In Russian)
- Znamensky S.E., Michurin S.V. (2013) Conditions of formation of Mindyak gold-sulfide deposit (Southern Ural): Structural and isotopic-geochemical aspects. *Litosfera*, (4), 121-135. (In Russian)
- Znamenskii S.E., Puchkov V.N., Michurin S.V. (2015) Sources of Ore-Forming Fluids and Formation Environments of Orogenic Au Deposits in the Main Uralian Fault Zone (Southern Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **464**(3), 313-316. (In Russian)