

ТУБИНСКО-ГАЙСКИЙ ПОЯС: ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗМЕЩЕНИЯ КОЛЧЕДАННОГО ОРУДЕНЕНИЯ В СВЕТЕ НОВЫХ ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО СОСТАВУ РУДОВМЕЩАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

© 2018 г. А. М. Косарев, И. Б. Серавкин

Реферат. В статье, по последним данным авторов, охарактеризованы петро-геохимические особенности колчеданосных палеовулканических комплексов Тубинско-Гайского пояса Магнитогорской мегазоны Южного Урала, в пределах которого в позднеэмско-раннеэфельское время формировались следующие комплексы, вмещающие ряд колчеданных месторождений: 1) бурибайский базальт-риолитовый (D_1e_2) (Бурибайское, Юбилейное месторождения), 2) гайский базальт-андезит-базальт-андезит-риолитовый (D_1e_2) (Гайское месторождение), 3) макан-октябрьский базальт-андезит-базальт-андезит-риолитовый (D_1e_2) (Маканское, Октябрьское месторождения), 4) баймакский базальт-андезит-базальт-андезит-риодацитовый (D_1e_2) (серия колчеданно-полиметаллических месторождений) и 5) подольский гибридный базальт-андезит-базальт-андезит-риодацитовый (D_2ef_1) (Подольское и другие более мелкие месторождения).

Состав рудовмещающих комплексов закономерно меняется в широтном направлении (с запада на восток), подчиняясь восточному погружению субдукционного слэба, от толеитовой островодужной и бонинитовой к известково-щелочной и субщелочной (шошонитовой) петрогенетическим сериям. Изменение состава вулканогенных комплексов коррелируется с особенностями оруденения (от медноколчеданного к колчеданно-полиметаллическому).

Широтная субдукционная зональность сочетается с зональностью по простиранию пояса: с юга на север гайский комплекс, вмещающий одно суперкрупное месторождение, сменяется бурибайским, макан-октябрьским и подольским комплексами, содержащими крупные Юбилейное, Подольское и ряд средних колчеданных месторождений, и далее — баймакским комплексом с многочисленными мелкими золото-колчеданно-полиметаллическими и барит-полиметаллическими объектами. Уменьшение суммарных запасов руд и металлов (Cu+Zn) и размеров отдельных месторождений коррелируется с изменением размеров рудовмещающих построек — от суперкрупной (диаметром 50 км) Гайской кольцевой структуры к крупным Маканской кальдере и Подольской кольцевой структуре (соответственно, диаметрами около 3 км и 17 км) и к многочисленным мелким (0.5–1.0 км) постройкам Баймакского рудного района.

Уточненные и установленные петролого-геохимические особенности рудовмещающих комплексов в совокупности с ранее полученными данными о геологическом строении Тубинско-Гайского пояса позволили сформулировать критерии колчеданности. Продуктивность колчеданного рудообразования возрастает с увеличением в рудоносных комплексах объемов толеитовых островодужных базальтов и, соответственно, с увеличением в них отношения Na_2O/K_2O и уменьшением содержания TiO_2 , Zr, PЗЭ и отношения La/Yb.

Ключевые слова: Тубинско-Гайский пояс, колчеданосные комплексы, петролого-геохимические особенности, субдукционная зональность, критерии рудоносности

Для цитирования: Косарев А.М., Серавкин И.Б. Тубинско-Гайский пояс: закономерности формирования и размещения колчеданного оруденения в свете новых петролого-геохимических данных по составу рудовмещающих комплексов // Геологический вестник. 2018. №2. С. 36–57. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-2-3>.

For citation: Kosarev A.M., Seravkin I.B. Tubinsk-Gai belt: regularities in the formation and location of massive sulfide mineralization in the light of new petrological-geochemical data on the composition of ore-bearing complexes // Geologicheskii vestnik. 2018. No.2. P. 36–57. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-2-3>.

TUBINSK-GAI BELT: REGULARITIES IN THE FORMATION AND LOCATION OF MASSIVE SULFIDE MINERALIZATION IN THE LIGHT OF NEW PETROLOGICAL-GEOCHEMICAL DATA ON THE COMPOSITION OF ORE-BEARING COMPLEXES

A. M. Kosarev, I. B. Seravkin

Abstract. According to the latest data of the authors, petro-geochemical features of the pyrite-bearing paleovolcanic complexes of the Tubinsk-Gai belt of the Magnitogorsk megazone of the Southern Urals are characterized. The following complexes were formed in the Late Emsian-Early Eifelian period, containing a number of pyrite deposits: 1) Buribay basalt-rhyolite (D_{1e_2}) (Buribayskoe, Yubileinoe deposits), 2) Gaisky basalt-andesibasalt-andesite-rhyolite (D_{1e_2}) (Gaiskoye deposit), 3) Makan-October basalt-andesibasalt-andesite (D_{1e_2}) (Makanskoye, Oktyabrskoye deposits), 4) Byamak basalt-andesibasalt-andesite-rhyodacite (D_{1e_2}) (series of pyrite-polymetallic deposits) and 5) Podolsky hybrid basalt-andesibasalt-andesite-rhyodacite (D_{2ef_1}) (Podolsk and other smaller deposits).

The composition of the ore-bearing complexes varies regularly in the latitudinal direction (from west to east), in accordance with the eastern submersion of the subduction slab, from the island-arc tholeiitic and boninitic to the calc-alkaline and subalkaline (shoshonitic). The change in the composition of volcanic complexes is correlated with the features of mineralization (from copper-pyrite to pyrite-polymetallic).

The latitudinal subduction zonation is combined with the zonation along the belt extension: from the south to the north the Gai complex containing one super-large deposit is changed by the Buribay, Makan-October and Podol complexes, containing large Yubileynoe, Podolsk and a number of medium-sized massive sulfide deposits; further on — by the Baymak complex with numerous small gold-massive sulfide-polymetallic and barite-polymetallic objects. The reduction of the total reserves of ores and metals (Cu+Zn) and the size of individual deposits correlates with the change in the size of ore-bearing structures — from the super-large (50 km in diameter) Gai ring structure to the large Makan caldera and Podol ring structure (respectively, diameters of about 3 km and 17 km) and to numerous small (0.5–1.0 km) buildings of the Baimak ore district.

Refined and established petrological and geochemical features of ore-bearing complexes in combination with previously obtained data on the geological structure of the Tubinsk-Gai belt made it possible to formulate criteria for massive sulfide fertility. The productivity of massive sulfide ore formation increases in the ore-bearing complexes with the increase of volumes of tholeiitic island-arc basalts in the ore-bearing complexes and, correspondingly, with the increase of the Na_2O/K_2O ratio and the decrease in the TiO_2 , Zr, REE and La/Yb ratio.

Key words: Tubinsk-Gai belt, massive-sulphide-bearing complexes, petro-geochemical features, subduction zonation, criteria for ore fertility

Введение

Тубинско-Гайский пояс, расположенный в Западно-Магнитогорской зоне Южного Урала, является одной из наиболее продуктивных на колчеданное оруденение и, соответственно, сравнительно хорошо изученных рудоносных зон Урала. Этот пояс вмещает более 30 колчеданных месторождений, сконцентрированных в Баймакском, Бурибай-Маканском, Подольском и Гайском рудных районах, в том числе таких крупных месторождений, как Юбилейное, Подольское и суперкрупное Гайское месторождение (рис. 1).

Установлено, что вулканогенные комплексы и колчеданные руды Тубинско-Гайского пояса

формировались в течение эмско-раннеэфельского цикла вулканизма (D_{1e_2} – D_{2ef_1}).

Многолетние исследования рудоносных формаций и месторождений рассматриваемого пояса, в которых авторы принимали активное участие [Вулканизм..., 1992; Вулканогенная..., 1994 и др.], позволили установить основные закономерности формирования и размещения колчеданного оруденения, в том числе поперечную (широтную) субдукционную и продольную (меридиональную) зональность в размещении рудоносных комплексов и колчеданных руд. Эта зональность, хорошо выраженная в Тубинско-Гайском поясе и очень важная для понимания процессов колчеданообразования, неоднократно рассматривалась авторами,

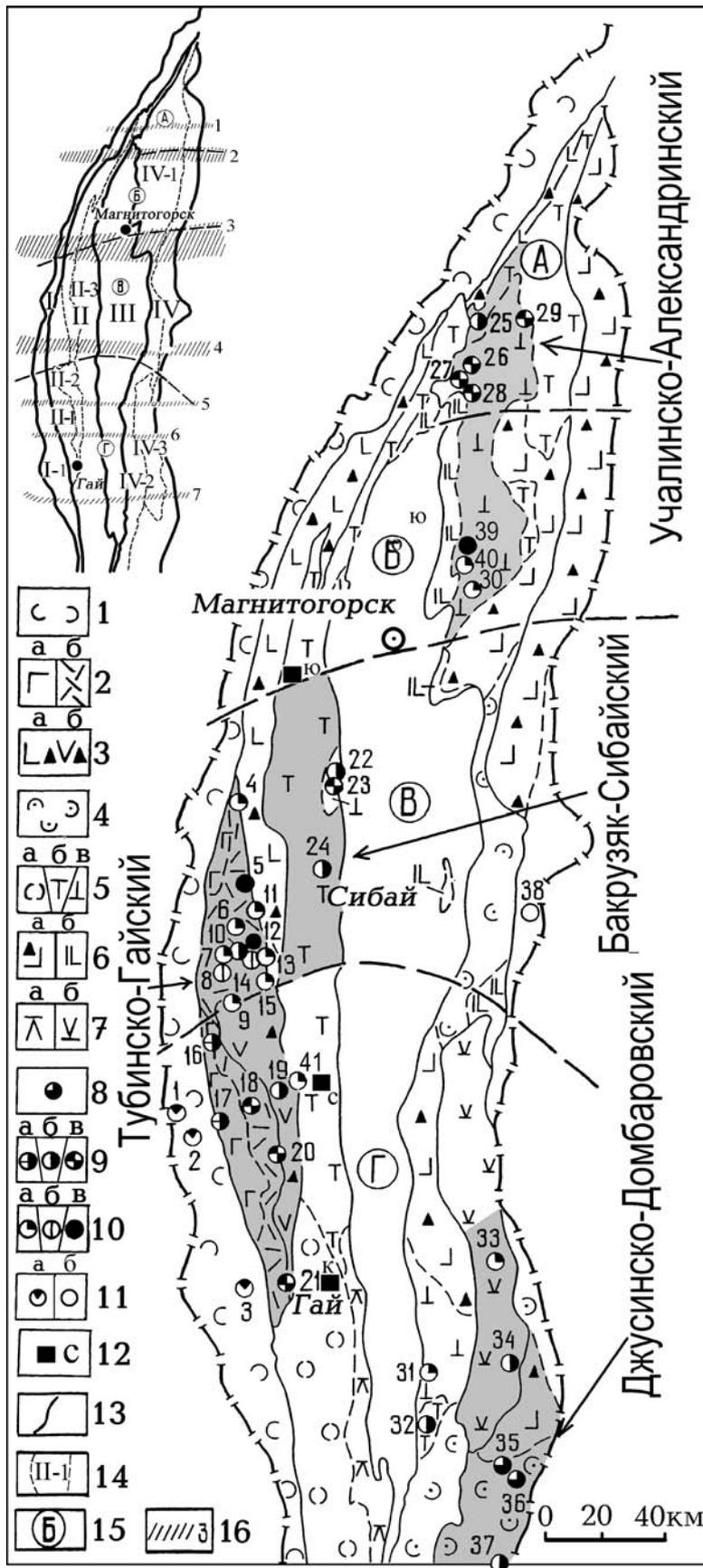


Рис. 1. Размещение колчеданных месторождений в вулканических комплексах Магнитогорской мегазоны [Серавкин, 2007]

Формации: 1 — преобладающая базальтовая (O-S), фрагменты трахибазальт-трахитовой (D_{1e}) и базальт-риолитовой (D_{1e}); 2 — базальт-риолитовая (D_{1e}): контрастный (а) и непрерывный (б) комплексы; 3 — андезито-базальтовая (D_{2ef1}): базальт-андезитобазальтовый (а) и гибридный базальт-андезит-риолитовый (б) комплексы; 4 — базальтовая (D_{1e}); 5 — базальт-риолитовая (D_{2ef2}): базальтовый (а), контрастный (б) и непрерывный (в) комплексы; 6 — андезито-базальтовая (D₂) — а, базальт-андезито-базальтовая (D_{3f}) — б; 7 — базальт-андезит-риолитовая: Юсинский (а) (D₂) и субшелочной Джусинский (б) (D_{2ef}) комплексы. **Колчеданные месторождения:** 8 — медноколчеданные (домбаровский тип); 9 — цинково-медноколчеданные, Cu > Zn, Уральский I подтип (а), медно-цинково-колчеданные, Cu < Zn, Уральский II подтип (б) и медно-цинковоколчеданные с полиметаллической минерализацией, Уральский III подтип, (в); 10 — золото-колчеданно-полиметаллические (а), золотобарит-полиметаллические (б) и золото-колчеданные (в) (баймакский тип); 11 — медноколчеданные (ивановский тип) — а, цинковоколчеданные (филизчайский тип) — б; 12 — положение безрудных участков: С — Савельевский, К — Калиновский, Ю — Юлдашевский. **Названия колчеданных месторождений:** 1 — Ивановское, 2 — Дергамышское, 3 — Ишкининское, 4 — Тубинская группа, 5 — Куль-Юрт-тау, 6 — Увараж, 7 — Бакр-тау, 8 — Горная Байкара, 9 — Майское, 10 — Таш-тау, 11 — Таналык-Баймакское, 12 — Семеновское, 13 — Юлалинское, 14 — Туба-Каин, 15 — Балта-тау, 16 — Юбилейное, 17 — Бурибайское, 18 — Маканская группа, 19 — Подольское, 20 — Мамбетовское, 21 — Гайское, 22 — Бакр-Узяк, 23 — Южный Бакр-Узяк, 24 — Сибайское, 25 — Учалинское, 26 — Озерное, 27 — Узельгинское, 28 — Молодежное, 29 — Таш-Яр, 30 — Александринское, 31 — Иссиргужинское, 32 — Западно-Ашебутакское, 33 — Джусинское, 34 — Барсучий Лог, 35 — Летнее, 36 — Осеннее, 37 — Весеннее, 38 — Амурское, 39 — Сабановское, 40 — Бабарыкинское, 41 — Восточно-Подольское. **Схема районирования:** 13 — границы Магнитогорской мегазоны и структурно-формационных зон 1-го порядка: I — Вознесенско-Присакмарская (зона Главного Уральского разлома), II — Западно-Магнитогорская, III — Центрально-Магнитогорская, IV — Восточно-Магнитогорская; 14 — границы и номера колчеданосных зон: I-1 — Ивановско-Ишкининская, II-1 — Таналыкская (Тубинско-Гайская), II-2 — Южно-Ирендыкская, II-3 — Сибайско-Орская, IV-1 — Учалинско-Александринская, IV-2 — Ашебутакская, IV-3 — Джусинско-Домбаровская; 15 — поперечные блоки: А — Учалинский, Б — Магнитогорско-Верхнеуральский, В — Баймакско-Кацбахский, Г — Орско-Джусинский; 16 — широтные дислокации: 1 — Буйдинская, 2 — Белорезцкая, 3 — Агаповская, 4 — Юлалинская, 5 — Подольская, 6 — Новочеркасская, 7 — Орская. Серым показаны колчеданосные палеовулканические пояса.

← Fig. 1. Location of massive sulfide deposits in volcanic complexes of the Magnitogorsk megazone [Seravkin, 2007]

Formations: 1 — predominant basaltic (O-S), fragments of trachybasalt-trachytic (D_{1e}) and basalt-rhyolite (D_{1e}); 2 — basalt-rhyolite (D_{1e}): contrast (a) and continuous (b) complexes; 3 — andesite-basalt (D_{2ef}): basalt-andesitebasalt (a) and hybrid basalt-andesite-rhyolite (b) complexes; 4 — basaltic (D_{2e}); 5 — basalt-rhyolite (D_{2ef}): basaltic (a), contrast (b) and continuous (b) complexes; 6 — andesite-basalt (D₂) — a, basalt-andesite-basalt (D_{2f}) — b; 7 — basalt-andesite-rhyolite: Dzhusinsky (a) (D₂) and sub-alkaline Dzhusinsky (b) (D_{2ef}) complexes. **Sulfide deposits:** 8 — copper-pyrite (Dombarovka type); 9 — zinc-copper pyrite, Cu > Zn, Ural I subtype (a), copper-zinc pyrite, Cu < Zn, Ural II subtype (b) and copper-zinc pyrite with polymetallic mineralization, Ural III subtype, (b); 10 — gold-pyrite-polymetallic (a), gold-barite-polymetallic (b) and gold-pyrite (b) (Baimak type); 11 — copper pyrite (Ivanovka type) — a, zinc-pyrite (Filizchay type) — b; 12 — position of barren sites: C — Savelievsky, K — Kalinovsky, Ju — Yuldashevsky. **The names of massive sulfide deposits are:** 1 — Ivanovka, 2 — Dergamysh, 3 — Ishkininsky, 4 — Tubinsk group, 5 — Kul-Yurt-tau, 6 — Uvaryazh, 7 — Bakr tau, 8 — Mountain Baikara, 9 — Mayskoe, 10 — Tash-tau, 11 — Tanalyk-Baimak, 12 — Semyonovsk, 13 — Yulalinsk, 14 — Tuba-Kain, 15 — Balta-tau, 16 — Jubileynoe, 17 — Buribay, 18 — Makan group, 19 — Podolsk, 20 — Mambetovsk, 21 — Gai, 22 — Bakr-Uzyak, 23 — South Bakr-Uzyak, 24 — Sibay, 25 — Uchaly, 26 — Ozernoe, 27 — Uzelga, 28 — Molodiozhnoe, 29 — Tash Yar, 30 — Alexandrinsky, 31 — Issirguzhinsky, 32 — West-Ashebutak, 33 — Dzhusa, 34 — Barsuchi Log, 35 — Summer, 36 — Autumn, 37 — Spring, 38 — Amur, 39 — Sabanovo, 40 — Babarykino, 41 — East Podolsk. **Scheme of regional zonation:** 13 — the boundaries of the Magnitogorsk megazone and the structural-formation zones of the 1st order: I — Voznesensk-Prisakmariian (zone of the Main Uralian Fault), II — West-Magnitogorsk, III — Central Magnitogorsk, IV — East Magnitogorsk; 14 — boundaries and numbers of massive sulfide zones: I-1 — Ivanovo-Ishkinino, II-1 — Tanalyk (Tubinsk-Gai), II-2 — South Irendyk, II-3 — Sibay-Orsk, IV-1 — Uchaly-Alexandrinsk, IV-2 — Ashebutak, IV-3 — Dzhusa-Dombarovsk; 15 — transverse blocks: A — Uchaly, B — Magnitogorsk-Verkhneural'sk, B — Baimak-Katsbakh, Г — Orsk-Dzhusinsk; 16 — latitudinal dislocations: 1 — Buydinsk, 2 — Beloret'sk, 3 — Agapovo, 4 — Julalinsk, 5 — Podolsk, 6 — Novocherkassk, 7 — Orsk. The massive sulfide-bearing paleovolcanic belts are shown in gray

в частности, и в недавних публикациях [Серавкин и др., 2017].

Вместе с тем полученные авторами новые петрохимические и геохимические данные по составу колчеданосных комплексов позволяют уточнить и углубить выясненные ранее закономерности и, что более важно, сформулировать новые критерии для поисков колчеданных руд.

Колчеданосные комплексы Тубинско-Гайского пояса

Как видно на рис. 1, северную часть пояса занимает Баймакский палеовулканический комплекс, вмещающий многочисленные месторождения одноименного рудного района. В средней, наиболее широкой части пояса, с запада на восток располагаются бурибайский, макан-октябрьский и подольский комплексы. К южной оконечности пояса приурочено Гайское месторождение, давшее название комплексу вмещающих его пород. Тубинско-Гайский пояс сложен главным образом отложениями баймак-бурибаевской (D_{1e}¹*b-br*) и верхнетаналыкской (D_{1e}²*vtm*) свит. Первая из них (нижняя свита) соответствует контрастной базальт-риолитовой, вторая — непрерывно дифференцированной базальт-андезит-риолитовой формациям.

Бурибайский комплекс (D_{1e}²) вмещает колчеданные месторождения Уральско-1 типа: Юбилейное и Бурибайское (№№ 16 и 17 на рис. 1). Комплекс слагают 3 толщи баймак-бурибаевской свиты (снизу вверх): 1) долерито-базальтовая, 2) пиллоу-базальт-вариолитовая и 3) базальт-риодацитовая.

Толща долерито-базальтов охарактеризована по данным предыдущих работ. В ее составе преобладают базальты умереннощелочной серии с колебаниями $\Sigma K_2O + Na_2O$ 5.62–6.56% и широкими вариациями количеств MgO, от низких (MgO — 4.2%) до высоких (MgO 8.4–9.1%), свидетельствующими, скорее всего, о фракционировании оливина [Spadea et al., 2002]. На диаграмме Пирса [Pearce, 1983] Nb/Yb — Th/Yb эта порода попадает в краевую часть поля бонинитов баймак-бурибаевской свиты [Косарев, 2015]. На границе с вышележащей толщей залегает пачка пиллоу-базальтов мощностью 20 м, характеризующаяся повышенными концентрациями TiO₂ (1.54%) и по особенностям химизма близкая к океаническим базальтам поляковской свиты.

Толща пиллоу-базальтов-вариолитов содержит нормально-щелочные и субщелочные магнезиальные базальты, бонинито-базальты, бониниты, магнезиальные андезиты (рис. 2).

Магнезиальные базальты (см. рис. 2) имеют содержания SiO₂ 48.4–52.8%, обладают низкой глиноземистостью (Al₂O₃ 11.5–13.25%), нормальной щелочностью (Na₂O+K₂O — 3.3–3.55%) и низкой калиевоностью, повышенной магнезиальностью (MgO 6–11%) и кальциевоностью (CaO 7.5–12%). Они занимают промежуточную позицию на диаграмме MgO — SiO₂ (см. рис. 2б) между бонинитами и оливиновыми базальтами [Spadea et al., 1998]. Среди магнезиальных базальтов присутствуют разновидности с повышенной щелочностью (субщелочные). В одной из проб содержание Na₂O достигает 5.54%, K₂O — 0.04%, MgO — 9.6%.

БУРИБАЙСКИЙ КОМПЛЕКС

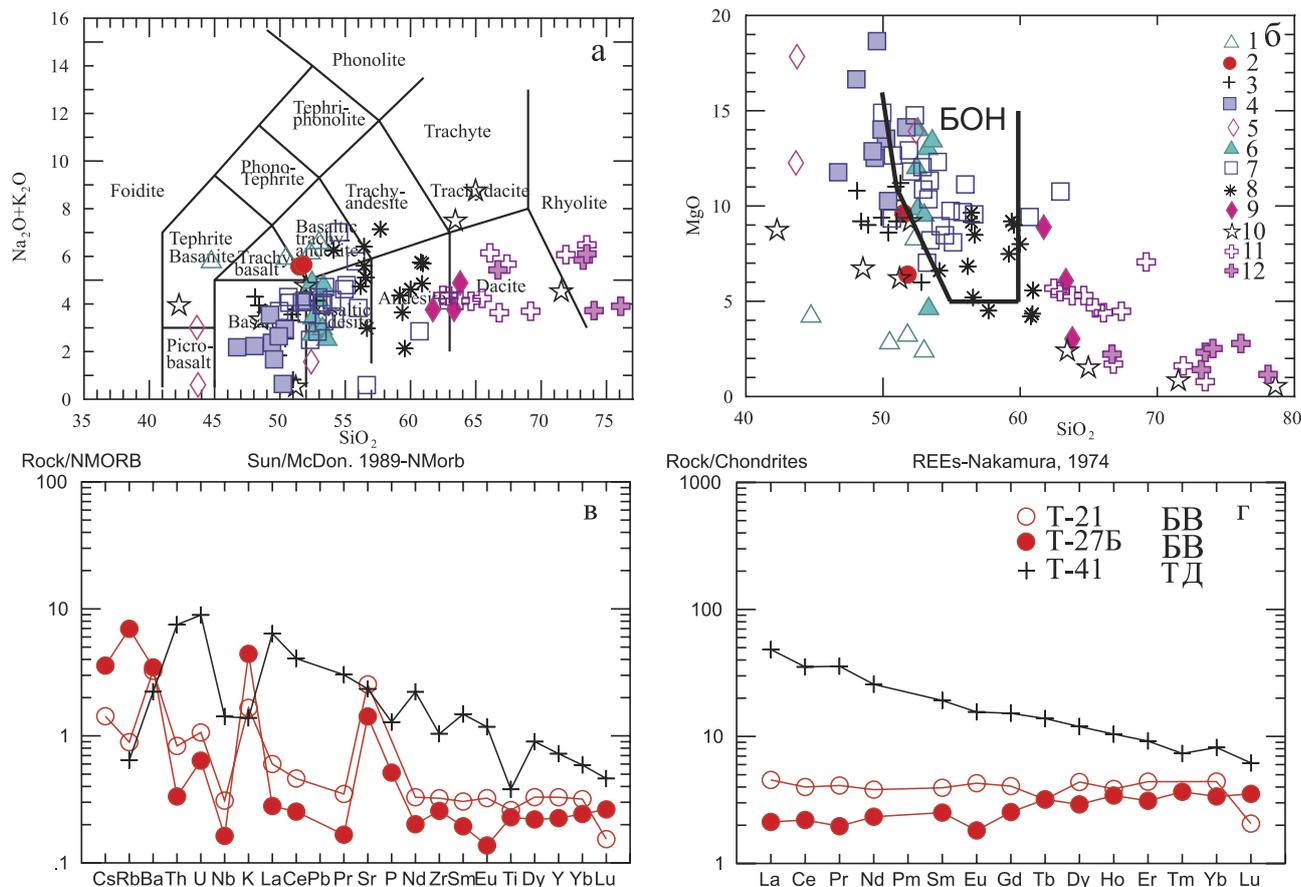


Рис. 2. Петрохимические особенности вулканитов бурибайского комплекса

а, б — диаграммы $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (а) и $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ (б): 1 — базальты умереннощелочные низкомагнезиальные (br_1); 2 — базальты умереннощелочные магнезиальные (br_{1-2}); 3 — базальты магнезиальные нормальной щелочности (br_2); 4 — бонинито-базальты (br_2); 5 — пикробазальты и бонинито-базальты Юбилейного колчеданного месторождения (br_2); 6 — бониниты высококальциевые разреза по р. Таналык у д. Хворостянка (br_2); 7 — бониниты из разрезов по р. Таналык у пос. Самарское и ручью Шанхай [Chistyakova, Latypov, 2011] (br_2); 8 — андезибониниты (br_2), Хворостянка; 9 — магнезиальные андезидацинты (br_2); 10 — кислые эффузивные породы у д. Хворостянка (br_3); 11 — кислые породы из даек у д. Хворостянка и в урочище Шанхай [Рудно-формационный..., 2001; Аржавитина, 1971]; 12 — кислые эффузивные породы Юбилейного месторождения [Симонов и др., 2004]. в, г — распределение редких и редкоземельных элементов на спайдердиаграммах пород/NMORB (в) и порода/хондрит (г): БВ — бонинитовый вариолит, ТД — трахидацинт.

Fig. 2. Petrochemical features of volcanites of the Buribay complex

а, б — diagrams $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (а), and $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ (б): 1 — basalts subalkaline low magnesian (br_1); 2 — basalts subalkaline magnesian (br_{1-2}); 3 — basalts magnesian calc-alkaline (br_2); 4 — boninito-basalts (br_2); 5 — picrobasalts and boninitobasalts of Yubileyny massive sulfide deposit (br_2); 6 — boninites high calcic of the Tanalyk river near Khvorostyanka village (br_2); 7 — boninites of the sections of Tanalyk river at Samarsk stream and Shanghai area [Chistyakova, Latypov, 2011] (br_2); 8 — andeziboninites (br_2), Khvorostyanka; 9 — Mg andezidatsity (br_2); 10 — acidic volcanic rocks from the Khvorostyanka (br_3); 11 — acid rocks from the dykes at the village Khvorostyanka and in the tract of Shanghai [Ore-formation..., 2001; Arzhavitina, 1971]; 12 — acidic volcanic rocks of the Yubileyny mine [Simonov et al., 2004]. в, г — distribution and rare earth elements in rocks spiderdiagram rocks/NMORB (в) and the rock/Chondrite (г): БВ — boninitic variolite, ТД — trachydacite.

Бонинито-базальты (см. рис. 2) содержат SiO_2 — 46–52%, характерные для базальтов высокие MgO (10.26–16.65%), пониженные и умеренные Al_2O_3 (10.11–15.68%) и CaO (2.88–9.87%), низкие Na_2O (0.43–3.68%) и K_2O (0.02–0.39%). Для бонинито-базальтов характерны высокие концентрации Cr (169–1011 г/т), Ni (56–381 г/т), умеренные — Co (28–47 г/т) и V (137–274 г/т), низкие содержа-

ния Pb (<0.15–9 г/т), Zr (24–79 г/т), Sc (19–36 г/т), Ba (26–85 г/т), широкий разброс концентраций Cu (16–184 г/т), Zn (38–332 г/т), Sr (36–203 г/т).

Бониниты бурибайского вулканического комплекса охарактеризованы в многочисленных работах [Spadea et al., 2002; Chistyakova, Latypov, 2011; Серавкин, Косарев, 1979; Вулканизм..., 1992; Кузьмин, Кабанова, 1991; Косарев, 2001; Косарев

и др., 2005; Косарев, Серавкин, 2009]. Большинство опубликованных аналитических материалов из данных работ использовано на петрохимических (см. рис. 2а, б) и геохимических (см. рис. 2в, г) классификационных диаграммах. В поле бонинитов (см. рис. 2б) располагаются составы собственно бонинитов, которые согласно Петрографическому кодексу России [2008] охватывают интервал SiO_2 52–58%, MgO 8–13%, *магнезиальных андезитов* (SiO_2 56–60%, MgO 5–10%) и андезидацитов (SiO_2 60–63.8%, MgO 3–10.6%) различных участков (см. рис. 2а, б).

В вариолях *бонинитовых вариолитов* присутствует кислое стекло в сочетании с кварц-альбитовым агрегатом. Состав кислого стекла и кварц-альбитового агрегата, содержащих вторичные минералы и поздний клинопироксен, варьирует в следующих пределах (масс. %): SiO_2 64.7–74.36, Al_2O_3 20.58–23.8, MgO 0.06–2.1, CaO 0.2–2.58, Na_2O 6.07–11.37, K_2O 0.04–3.4. По составу вариоли отличаются от кремнекислых пород бурибайского комплекса повышенными глиноземистостью, суммарной щелочностью, натриевостью и, в отдельных случаях, калиевостью, что не позволяет безоговорочно считать вариоли аналогами и предтечей кислых пород.

Базальт-риолитовая толща в основном сложена кислыми эффузивами с прослоями базальтов. В кислых эффузивных породах диапазон колебаний K_2O варьирует от 0.05 до 1.68%, Na_2O — от 4.3 до 8.65%. В наиболее щелочных разновидностях обнаруживаются повышенные количества РЗЭ и высокие значения La/Yb , что свидетельствует о первичномагматической умереннощелочной специфике этих пород. Концентрации Zr в кислых породах бурибайского комплекса варьируют от 47 до 84 г/т, что сопоставимо с аналогичными породами толеитовой и бонинитовой серий островных дуг Тонга-Кермадек и Южно-Сандвичевой [Петрология и геохимия..., 1987].

Колчеданные месторождения бурибайского комплекса (Бурибайское и Юбилейное) относятся к уральскому-1 типу, характеризующемуся значительным преобладанием Cu над Zn и залеганием среди базальтов или на границе подстилающих базальтов и перекрывающих руды кислых вулканитов.

Так, Юбилейное месторождение, крупное по запасам руд и металлов (2714 тыс. т Cu и Zn), локализовано в верхней части разреза бурибайского комплекса. Наиболее крупные рудные тела залегают непосредственно на базальтах пиллоу-базальт-

вариолитовой толщи (*b-br₂*) и перекрываются кислыми породами (*b-br₃*), среди которых присутствуют мелкие рудные тела.

По сумме имеющихся данных основные особенности рассмотренного комплекса сводятся к следующему.

1. Подрудные вулканиты представляют собой единую ассоциацию бонинитовой серии. В эту ассоциацию входят и пикробазальты, обнаруженные И.Б. Серавкиным на рудном поле Юбилейного месторождения.

2. В основании толщи пиллоу-базальтов-бонинитов установлено проявление эффузивных подушечных базальтов, по химизму близких к основным породам подводных океанических плато. Эти базальты можно увязывать с разрывом слэба и проявлением вулканизма, близкого к внутриплитному.

Баймакский, макан-октябрьский и гайский колчеданноносные комплексы, расположенные с севера на юг в Тубинско-Гайском рудоносном поясе, сложены преимущественно отложениями верхнетаналыкской свиты (*D_{1e2} vtn*), представленной непрерывной базальт-андезит-риолитовой формацией.

Баймакский комплекс вмещает более 20 мелких барит-золото-полиметаллических колчеданных месторождений (№№ 4–15 на рис. 1) [Колчеданные месторождения..., 1973; Серавкин, 1986; и др.]. В нижней части разреза комплекса (месторождение Бакр-тау и др.) встречаются контрастные базальт-риодацитовые пачки вулканитов, характерные для бурибайского комплекса, но основной объем баймакского комплекса слагают отложения верхнетаналыкской свиты, в которой выделяются две толщи. Нижнюю из них слагают вулканиты андезибазальтового и андезитового состава (последние тяготеют к верхам толщи [Серавкин, 1986; и др.]). В верхней толще преобладают кислые вулканиты. Колчеданно-полиметаллические месторождения локализованы как в нижней толще, занимая положение в кровле кислых пород (Бакр-тау и Тубинское), так и в верхней, располагаясь в пачках вулканитов андезитового состава (Восточно-Семеновское) или, чаще, ассоциируясь с прослоями кислых пород среди нижней толщи (Таш-тау) и залегая в кровле кислых вулканитов (Майское).

К петро-геохимическим особенностям баймакского комплекса, выясненным авторами, относятся следующие:

1. Базальты баймакского комплекса [Косарев и др., 2005] относятся к магнезиальной известково-

щелочной серии (рис. 3): MgO 6.6–10.63%, Al_2O_3 14.53–17%, FeO_t 7.4–9.12%, Ba 87–132 г/т, Sr 57–251 г/т, Zr 33–75 г/т. В единичных пробах андезибазальтов и андезитов содержания MgO достигают 6%, базальтов — 8%. Все фигуративные точки располагаются вблизи, редко на границе поля бонинитов и известково-щелочных пород в координатах $SiO_2 - MgO$. Широкий размах содержаний обнаруживают Sr 42–430 г/т, Ni 98–290 г/т, что может быть связано с присутствием Sr -шпинели или фракционированием оливина.

2. Кислые породы баймакского комплекса в основном вписываются в известково-щелочную магнезиальную серию (см. рис. 3).

По соотношениям количеств Rb с Y и Nb , Rb с Yb и Ta , Nb с Y [Pearce et al., 1984] фигуративные точки проанализированных кислых пород (рис. 4е, ж, з) располагаются в поле составов надсубдукционных вулканических дуг.

По концентрациям Al_2O_3 и Yb (см. рис. 4д, з) кислые эффузивные, субвулканические и интрузивные породы баймакского комплекса занимают позицию, промежуточную между низкоглиноземистыми (океаническими) и высокоглиноземистыми (континентальными) трондьемитами [Арт, 1983]. По содержаниям Yb большинство фигуративных точек кислых пород располагается в поле составов, обедненных тяжелыми РЗЭ, меньшая

БАЙМАКСКИЙ КОМПЛЕКС

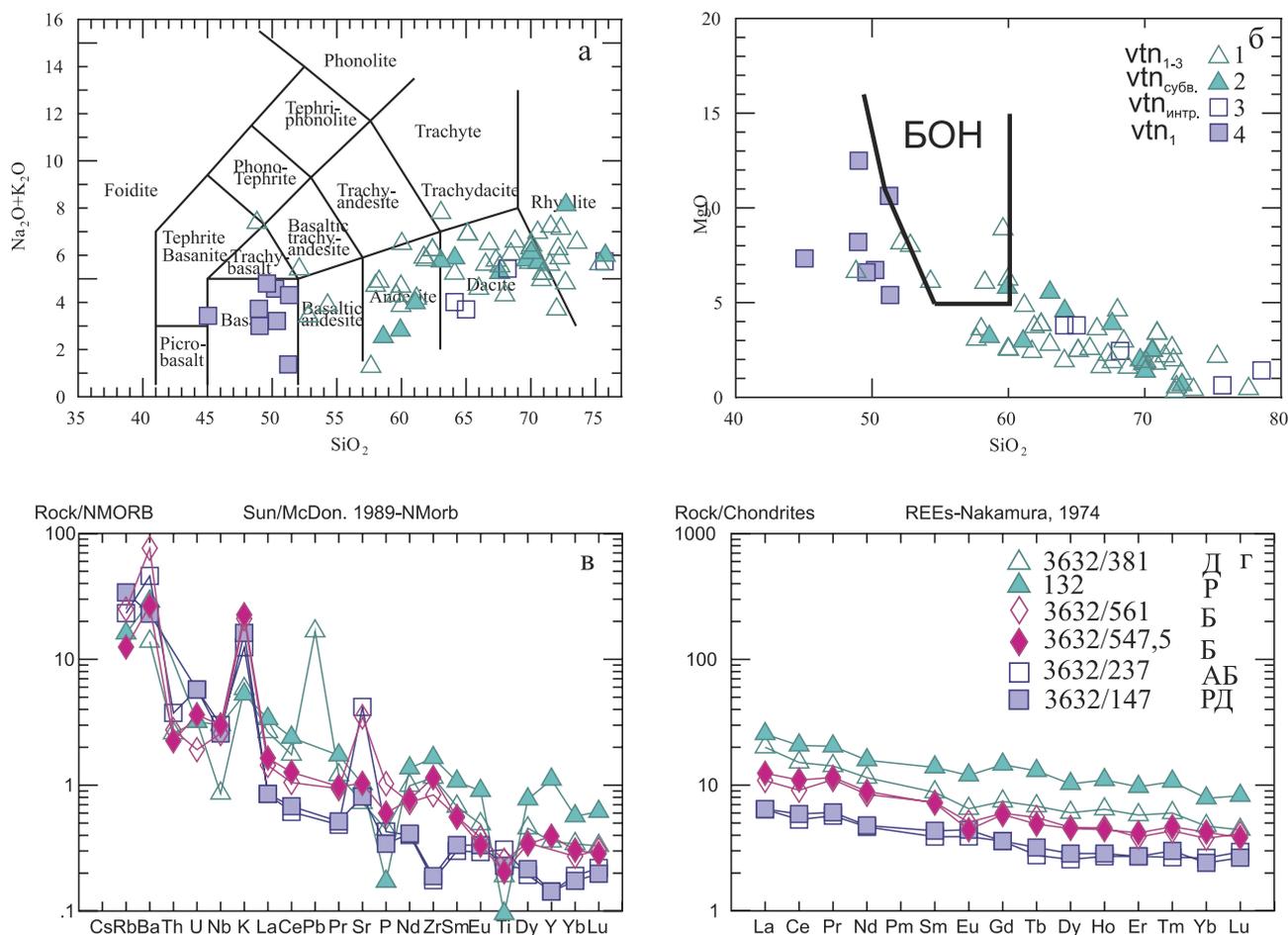
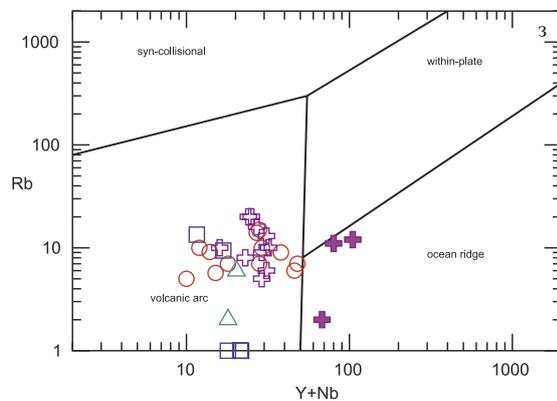
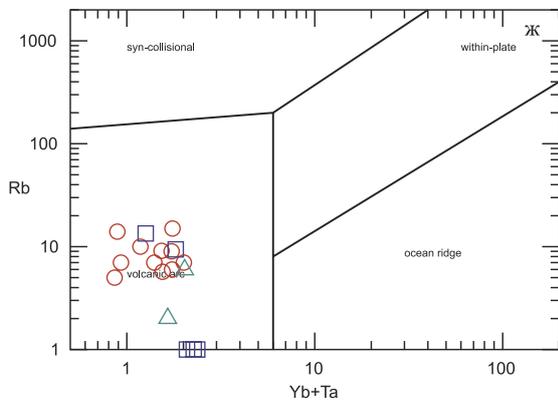
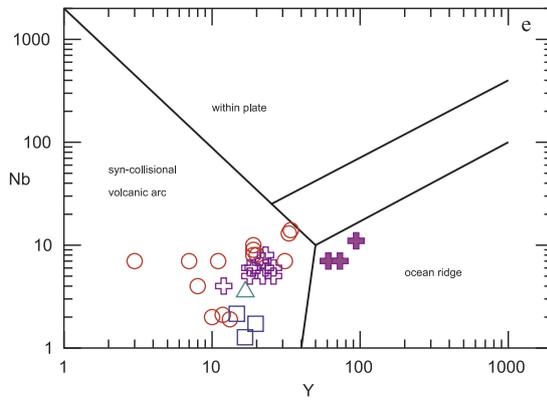
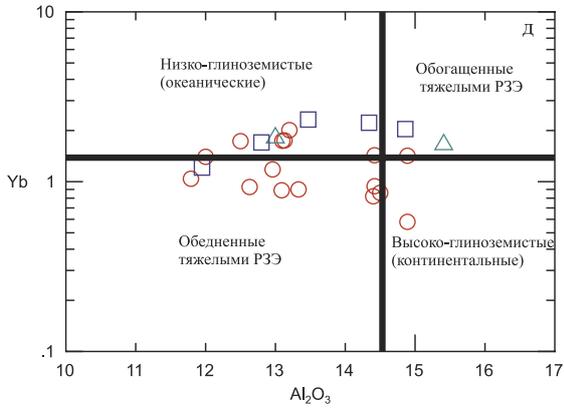
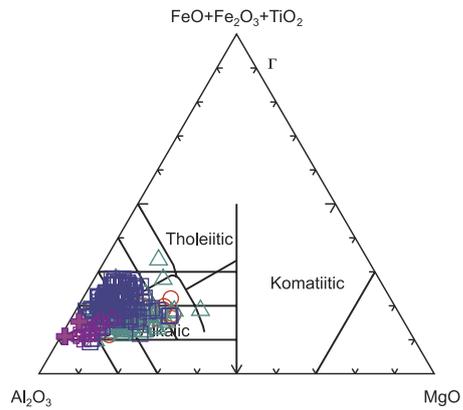
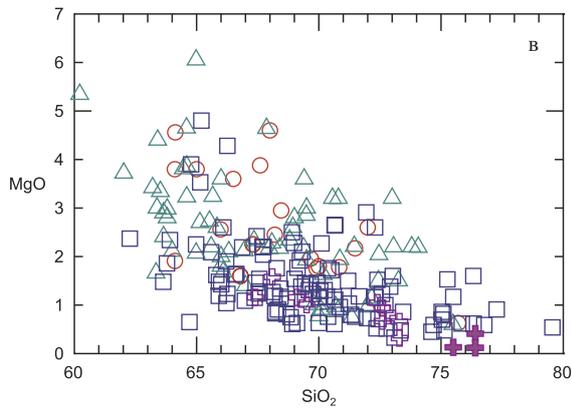
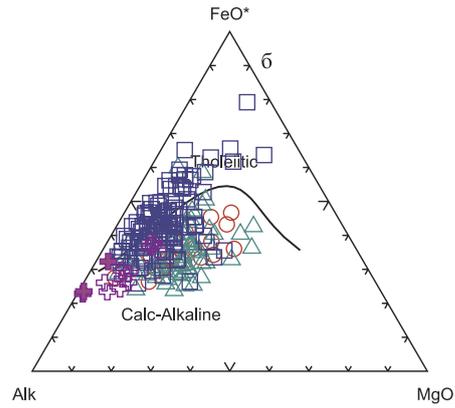
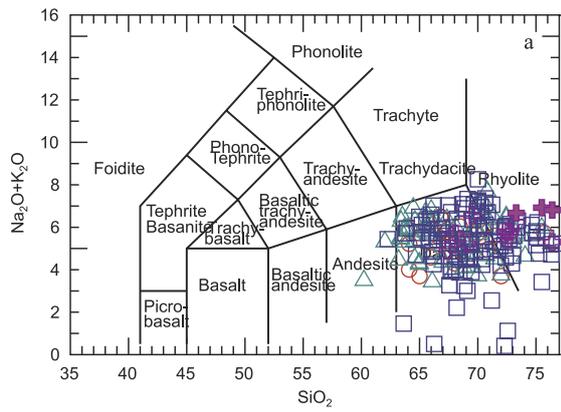


Рис. 3. Петрохимические (а, б) и геохимические (в, г) особенности пород баймакского комплекса

а, б: 1 — эффузивные породы; 2 — субвулканические дациты, риодациты; 3 — интрузивные гранодиориты и плагиограниты; 4 — базальты [Колчеданные месторождения..., 1973; Косарев и др., 2014]; БОН — поле бонинитов. в, г: Д — дацит, Р — риолит, Б — базальт, АБ — андезибазальт, РД — риодацит.

Fig. 3. Petrochemical (а, б) and geochemical (в, г) features of the rocks of the Baymak complex

а, б: 1 — effusive rocks; 2 — subvolcanic dacites, rhyodacites; 3 — intrusive granodiorites and plagiogranites; 4 — basalts [The massive sulfide..., 1973; Kosarev et al., 2014]; БОН — field of boninites. в, г: Д — dacite, Р — rhyolite, Б — basalt, АБ — andesibasalt, РД — rhyodacite.



○ 1 △ 2 □ 3 + 4 + 5

← Рис. 4. Петрохимические и геохимические особенности кислых вулканитов Тубинско-Гайского палеовулканического пояса. Верхнетаналькская свита ($D_1e_2^2$)

1 — Баймакского рудного района, 2 — Мокан-Октябрьского рудного района, 3 — Гайского рудного поля, 4 — Трондьемиты комплекса Литл-Порт, 5 — Трондьемиты комплекса Бей-оф-Айлендс [Трондьемиты ..., 1983].

Fig. 4. Petrochemical and geochemical features of acid volcanics of the Tubinsk-Gai paleovolcanic belt. The Verhnetanalyk Formation ($D_1e_2^2$)

1 — Baymak ore district, 2 — Makan-Oktyabrsk ore district, 3 — Gai ore field, 4 — Trondjemites of the Little Port complex, 5 — Trondjemites of the Bay-of-Islands complex [Trondhjemites..., 1983].

часть точек попадает в область обогащенных Yb составов пород. Границу между полями обогащенных ТРЗЭ и обедненных ими Д.Г. Арт [1983] проводит на уровне концентраций Yb 1.5 г/т. Наиболее заметно обогащены Yb интрузивные породы плагиогранитного и гранодиоритового составов, в которых концентрации Yb варьируют от 1.4 до 1.74 г/т.

На спайдердиаграммах (см. рис. 3) нормированных значений РЗЭ виден нисходящий от легких к тяжелым РЗЭ характер вариационных кривых, свидетельствующий об обогащении пород ЛРЗЭ и обеднении ТРЗЭ.

На спайдердиаграмме порода/NMORB в большинстве случаев проявлены негативные аномалии Ti, Y, P, Nb, к которым нередко присоединяются U и Th, La, Ce, Pr. Во многих случаях (см. рис. 3в, г) присутствуют положительные геохимические аномалии K, Sr, Zr, Ba. Следует отметить, что негативные аномалии Nb в субвулканических и интрузивных породах проявлены слабее, что можно объяснить более высокими его концентрациями в этих породах, по сравнению с эффузивными дацитами и риодацитами. В целом распределение нормированных значений петрогенных и микроэлементов на спайдердиаграммах кремнекислых пород отражает сложный характер возникновения и эволюции всего фациального ряда кремнекислых пород, включающих процессы выплавления материнских магм, флюидную и кристаллизационную дифференциацию и постмагматические метаморфо-метасоматические преобразования. Нельзя исключить, что кремнекислые породы экстрозивно-субвулканической и интрузивной фаций, имеющие сходство с трондьемитами, могли возникнуть на завершающем этапе вулканического цикла.

3. Месторождения баймакского комплекса относятся к Au-колчеданно-полиметаллическому типу ($Zn > Cu + Au$) [Серавкин, 2007]. Все месторождения по запасам мелкие, с суммарным количеством Cu и Zn от 58.1 до 100 тыс. т. Среди руд баймакских месторождений выделяются медно-цинковые, медно-цинково-свинцовые, золото-колчеданные,

золото-баритовые, золото-барит-полиметаллические, цинковоколчеданные и др. Структурные соотношения руд, эффузивно-экструзивных и экструзивно-субвулканических пород свидетельствуют о раннем формировании массивных Cu-Zn колчеданных руд и более позднем — полиметаллических и золото-баритовых разновидностей. Поздняя стадия рудообразования проходила после внедрения кислых пород экструзивно-субвулканического комплекса.

Мокан-октябрьский комплекс, вмещающий одноименные месторождения (№ 18 на рис. 1), занимает центральное положение в Тубинско-Гайском металлогеническом поясе между Баймакским и Гайским рудными районами. Главной рудоконтролирующей структурой на этой площади является вершинная кальдера Моканского стратовулкана, имеющего диаметр основания около 17 км и размер кальдеры по меридиану — 3 км. Комплекс состоит из трех толщ: нижней, базальт-андезит-базальтовой, средней, андезит-андезитбазальтовой и верхней, дацит-риолитовой [Вулканизм..., 1992; Среднепалеозойский..., 1983]. Преобладающая масса вулканитов собственно мокан-октябрьского колчеданноносного комплекса принадлежит к известково-щелочной магнезиальной серии. В подчиненном количестве присутствуют вулканиты умеренно-щелочной (базальты) и бонинитовой серий (рис. 5б), а также толеитовой магнезиальной серии. Принадлежность части базальтов к толеитовой магнезиальной серии подтверждается распределением РЗЭ (см. рис. 5г, пробы БТ).

Таким образом, большинство пород рассматриваемого комплекса принадлежит к магнезиальной известково-щелочной серии, что сближает его с баймакским комплексом. Отличительной чертой мокан-октябрьского комплекса является присутствие вулканитов островодужной толеитовой магнезиальной серии.

Гайский комплекс, вмещающий суперкрупное Гайское месторождение (№ 21 на рис. 1), контролируется крупной кольцевой структурой диаметром около 50 км, внутри которой по геофизическим

МАКАН-ОКТЯБРЬСКИЙ КОМПЛЕКС

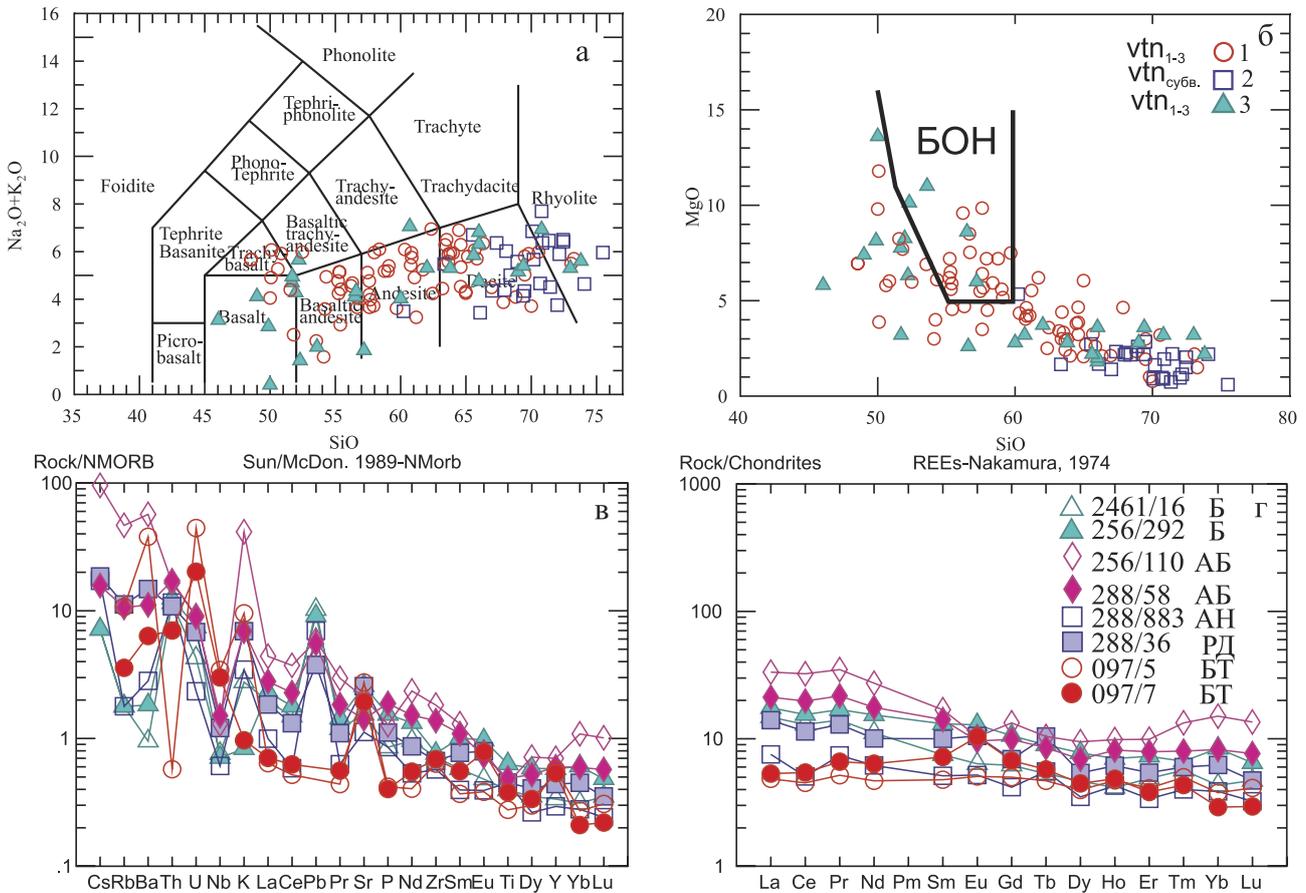


Рис. 5. Петрохимические (а, б) и геохимические (в, г) особенности пород макан-октябрьского палеовулканического комплекса

а, б: 1 — эффузивные породы, 2 — субвулканические и экструзивные породы [Биков, 1973ф], 3 — эффузивные породы [Петрографический..., 2008; неопубликованные материалы автора]; в, г: Б — базальт, АБ — андезибазальт, АН — андезит, РД — риодацит, БТ — базальт толеитовый.

Fig. 5. Petrochemical (a, б) and geochemical (в, г) features of the rocks of the Makan-October paleovolcanic complex

а, б: 1 — effusive rocks, 2 — subvolcanic and extrusive rocks [Биков, 1973ф], 3 — effusive rocks [Petrographic..., 2008; unpublished materials of the author]; в, г: Б — basalt, АБ — andesibasalt, АН — andesite, РД — rhyodacite, БТ — basalt tholeiitic.

данным [Прокин и др., 2004] отмечается куполообразное поднятие диаметром 22–32 км. По данным геологоразведочных и научно-исследовательских работ [Прокин и др., 2004; Бородаевская и др., 1979; Серавкин, Скуратов, 2009; и др.] гайский комплекс слагают 2 толщи: 1) нижняя базальтовая, вскрытая наиболее глубокими скважинами и 2) рудовмещающая андезит-дацит-риолитовая [Прокин и др., 2004]. В рудовмещающей толще М.Б. Бородаевской с соавторами [1979] выделялось 3 подтолщи, образованные соответствующими ритмами вулканизма и завершившиеся рудообразованием: 1) нижняя андезит-дацитовая, 2) средняя риолито-дацитовая и 3) верхняя дацитовая. Подрудная

базальтовая и рудовмещающая дифференцированная толщи относится к баймак-бурибаевской свите (D_{1eb-br}) и слагают сильно деформированную вулканическую постройку брахиантиклинальной формы. Рудовмещающая постройка перекрыта отложениями ирендыкской свиты (нижняя вулканогенно-осадочная и верхняя андезито-базальтовая толщи) (D_1-D_{2ef}) и флишоидными отложениями улутауской свиты ($D_{2ef}-\dot{z}v$).

Авторами уточнен петро- и геохимический состав рудовмещающей и подрудной толщ.

Совокупность петрохимических и геохимических материалов позволяет выделять в составе гайского колчеданоносного комплекса толеитовую

островодужную, известково-щелочную, включающую серию с повышенной магниальностью, и умереннощелочную серии. Толеитовые базальты имеют следующий состав: SiO_2 45.2–53.28%, TiO_2 0.5–0.75%, Al_2O_3 15–20.1%, FeO_t 9–12.85%, MgO 2.33–6%, CaO 3.18–9.76%, Na_2O 1.05–4.32%, K_2O 0.04–1.77%, Rb 2–9 г/т, Sr 60.1 г/т, Co 38.1 г/т, Ni 28.6 г/т, Cu 10.3 г/т, Zn 102 г/т, Y 7.84 г/т, Nb 0.84 г/т, Zr 12.9 г/т, Th 0.17 г/т, La 1.17 г/т, Yb 0.72 г/т La/Yb 1.6. Весьма показательны для обоснования серийной принадлежности вулканитов гайского комплекса спайдердиаграммы, построенные по нормированным концентрациям микроэлементов (рис. 6в–е). Толеитовые базальты отличаются низкими концентрациями РЗЭ, Cr , Ni , Cu , Nb , Zr , Th , в них проявлены негативные геохимические аномалии Nb , Zr , La , Ce , положительные Sr , Pb . Базальты умереннощелочной серии имеют (см. рис. 6г) более высокий уровень концентраций РЗЭ и слабый наклон графика порода/хондрит от ЛРЗЭ к ТРЗЭ. Проанализированные кислые породы обнаруживают слабое обогащение ЛРЗЭ, характерное для известково-щелочных серий. На диаграммах, построенных по петрогенным оксидам, видно, что все кислые породы обладают нормальной щелочностью, характерной для известково-щелочных серий (см. рис. 6а, б). На диаграммах АФМ, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{FeO}_t - \text{MgO}$ кислые породы гайского комплекса располагаются в поле как известково-щелочной, так и толеитовой серий. По глиноземистости и концентрациям Yb большая часть кислых пород относится к низкоглиноземистому типу с обогащением Yb , характерному для океанических ассоциаций. На диаграммах Пирса [Pearce et al., 1984] кислые породы гайского комплекса располагаются в поле вулканических дуг и образуют поле, единое с трондьемитами типа Литл-Порт [Малпас, 1983]. Эти сведения позволяют предполагать, что часть кислых пород возникла в результате частичного плавления базитов нижней коры. Наличие переходных типов пород между основными и кислыми разновидностями свидетельствует о процессах магматической и кристаллизационной дифференциации в промежуточных магматических очагах на путях движения магм к поверхности.

Таким образом, вулканиты гайского комплекса обладают совокупностью петрохимических и геохимических особенностей, присущих другим комплексам Тубинско-Гайской зоны — бурибайскому и макан-октябрьскому. Гайский комплекс совмещает вулканиты умеренно-щелочной, толеитовой островодужной и известково-щелочной серий.

Подольский палеовулканический комплекс (D_2ef_1ir) расположен в западном крыле Магнитогорского мегасинклинория, в Южно-Ирендыкской структурно-фациальной зоне, к востоку от макан-октябрьского комплекса (см. рис. 1). Основной структурой подольского комплекса является одноименный кальдера-вулкан [Серавкин, Косарев, 1983], вмещающий крупное Подольское и ряд более мелких месторождений. В строении кальдера-вулкана выделяются 4 толщи (снизу вверх): 1 — дацит-риолитовая (вмещающая Подольское месторождение), 2 — кварцевых андезитов и андезибазальтов (гибридная), 3 — пиллоу-базальт-дацит-риодацитовая, 4 — андезибазальт-кварцево-андезит-риодацитовая. На северо-восточном и восточном флангах кальдера-вулкана залегает посткальдерная (сукраковская) толща К-На трахидацит-риолитов.

По петрохимическим и геохимическим материалам вулканиты четырех толщ внутрикальдерного комплекса относятся к серии, промежуточной между толеитовой островодужной и известково-щелочной сериями (рис. 7а, б). Исключение составляют надрудные пиллоу-базальты третьей толщи, которые относятся к островодужной толеитовой, реже к умереннощелочной сериям. Отнесение к промежуточной («переходной») серии связано с тем, что кислые породы нижней толщи, кварцевые андезиты и андезибазальты второй и четвертой толщ не обнаруживают характерного для толеитовой серии накопления железа. В то же время эти породы имеют уровень концентраций Zr , Y , Ba , La , Sm , U , Th , характерный для толеитовых серий. При этом стиль распределения РЗЭ, с характерным накоплением легких лантаноидов относительно тяжелых, указывает на наличие в этих вулканитах известково-щелочных свойств. Базальты третьей толщи по своим геохимическим характеристикам, включая РЗЭ, относятся к островодужной толеитовой серии, а кремнекислые породы той же толщи имеют широкий размах характеристик с параметрами как толеитовой, так и известково-щелочной серий (см. рис. 7а–г). Примером таких серий в кайнозойских островных дугах могут служить вулканиты дуги Фиджи [Петрология..., 1987].

Интрузивные породы подольского комплекса по содержаниям SiO_2 варьируют от габбро-диоритов до гранитов. На диаграммах $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ и $\text{SiO}_2 - \text{MgO}$ большая часть интрузивных пород имеет близкие и пониженные концентрации суммарной щелочности и повышенные количества MgO (см. рис. 7а, б), что, скорее всего, связано

ГАЙСКИЙ КОМПЛЕКС

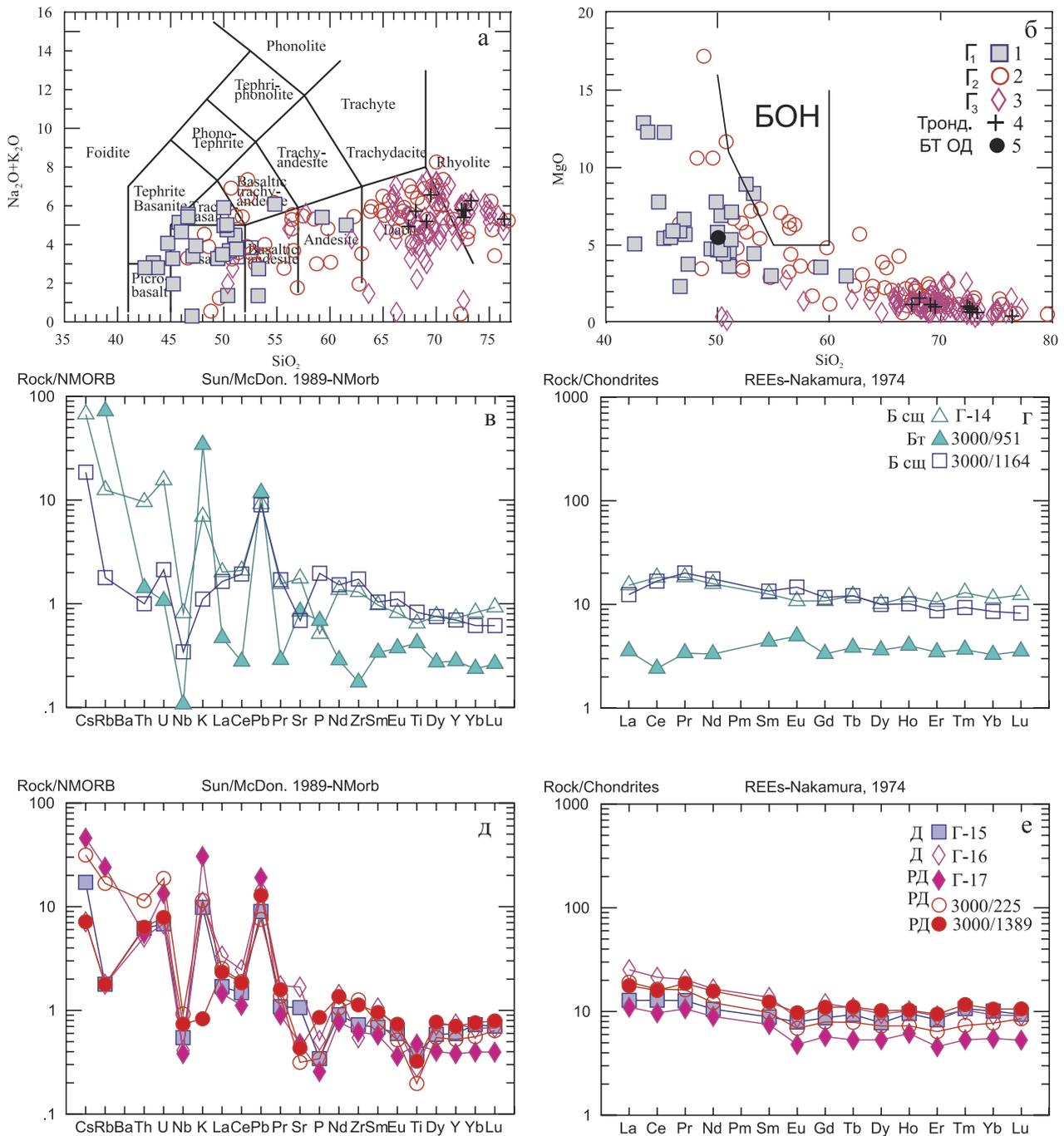


Рис. 6. Петрохимические (а, б) и геохимические (в, г, д, е) особенности вулканитов гайского комплекса

а, б: 1 — базальты и андезиты нижней толщи, 2 — вулканиты базальт-андезит-дацит-риолитового состава нижней подтолщи второй толщи, 3 — вулканиты дацит-риолитового состава верхней подтолщи второй толщи, 4 — тронджемиты [Малпас, 1983], 5 — БТ ОД (базальт толеитовый островных дуг), БОН — поле бонинитов; в, г — основные породы: Б_{сщ} — базальт субщелочной, Б_т — базальт толеитовый; д, е — кислые породы: Д — дацит, РД — рхиодацит.

Fig. 6. Petrochemical (а, б) and geochemical (в, г, д, е) features of volcanics of the Gai complex

а, б: 1 — basalts and andesites of the lower stratum, 2 — volcanites of the basalt-andesite-dacite-rhyolite composition of the lower sub-basin of the second stratum, 3 — volcanites of the dacite-rhyolite composition of the upper sub-basin of the second sequence, 4 — trondhjemitites [Malpas, 1983], 5 — БТ ОД (basalt of tholeiitic island arcs), БОН — field of boninites; в, г — basic rocks: Б_{сщ} — basalt subalkaline, Б_т — basalt tholeiitic; д, е — acid rocks: Д — dacite, РД — rhyodacite.

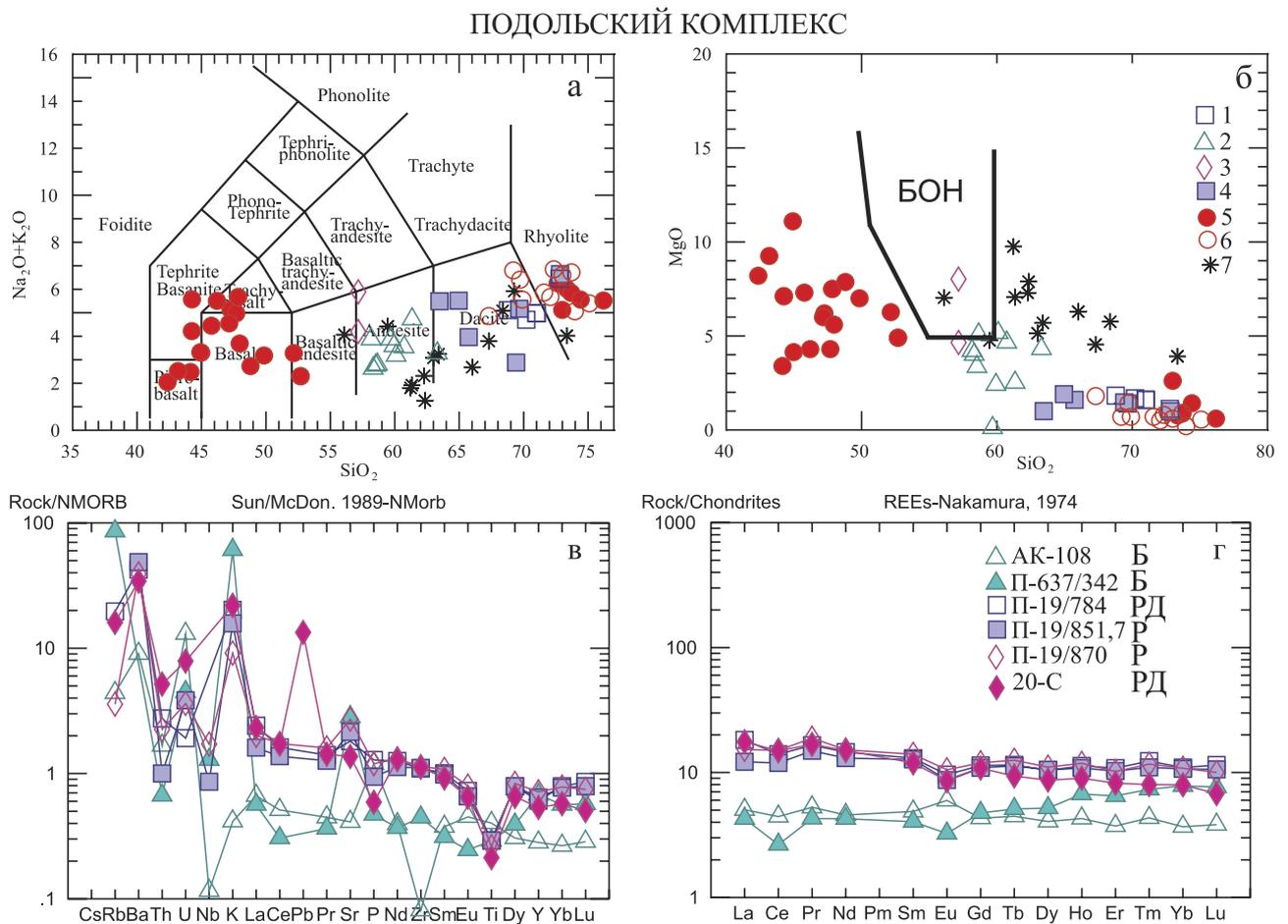


Рис. 7. Петрохимические (а, б) и геохимические (в, г) особенности подольского палеовулканического комплекса
 а, б: 1 — дациты и риодациты нижней толщи ирендыкской (*ir*) свиты, 2 — кварцевые андезиты первой (нижней) и второй толщ *ir* свиты, 3 — кварцевые андезиты месторождения Балта-тау, 4 — кислые породы второй и третьей толщ *ir* свиты, 5 — базальты и риолиты третьей толщ *ir* свиты, 6 — риодациты и риолиты экструзивные и субвулканические, 7 — габбро-диориты и плагиограниты; в, г: Б — базальт, РД — риодацит, Р — риолит.

Fig. 7. Petrochemical (a, б) and geochemical (в, г) features of the Podol paleovolcanic complex

а, б: 1 — dacites and rhyodacites of the lower stratum of the Irendyk (*ir*) suite, 2 — quartz andesites of the first (lower) and second strata of the *ir* suite, 3 — quartz andesites of the Balta-tau deposit, 4 — acid rocks of the second and third layers of the *ir* suite, 5 — basalts and rhyolites of the third thickness of the *ir* suite, 6 — rhyodacites and rhyolites, extrusive and subvolcanic, 7 — gabbro-diorites and plagiogranites; в, г: Б — basalt, РД — rhyodacite, Р — rhyolite.

с подрудным положением этого комплекса. По петрографическим и петрохимическим материалам в интрузивных породах обнаруживается постоянная хлоритизация, пиритовая, редко халькопиритовая минерализация, альбитизация плагиоклаза, эпидотизация.

Руды крупного (2780.4 тыс. т Cu+Zn) Подольского месторождения уральского 2 типа образуют Cu-Zn-колчеданную залежь, расположенную в апикальной зоне экструзивного купола, венчающего нижнюю толщу подольского комплекса.

Таким образом, подольский колчеданоносный комплекс сформировался в Южно-Ирен-

дыкской зоне, в области развития гибридной дифференцированной формации ирендыкской свиты ($D_2ef_1ir_{1-4}$).

Восточно-подольский (сукраковский) комплекс, вмещающий одноименное месторождение (№ 41 на рис. 1), расположен на северо-восточном фланге Подольского кальдера-вулкана, и образован пятой толщей ирендыкской свиты ($D_2ef_1ir_5$).

Комплекс имеет ритмично-слоистое строение и сложен преобладающими вулканическими брекчиями, туфами и тефроидами. Вблизи палеовулканических центров встречаются экструзивные тела и эффузивные потоки трахидацитов.

Палеовулканическая и металлогеническая зональность Тубинско-Гайского пояса

Рассматриваемый пояс обладает отчетливо выраженной зональностью в размещении вулканических комплексов и колчеданного оруденения, выраженной в закономерном изменении петрогеохимических свойств вулканитов, состава и размеров оруденения. Зональность проявляется как в широтном, так и в меридиональном направлениях. Широтная зональность наиболее отчетливо проявилась в средней части пояса, где она является фрагментом более обширной зональности, охватывающей сопредельные зоны с запада (ивановский комплекс зоны Главного Уральского разлома, ГУР) и с востока (сукраковский комплекс восточной части Западно-Магнитогорской зоны и джусинский, киембаевский и акжарский комплексы Восточно-Магнитогорской зоны).

Широтная зональность обусловлена восточным погружением субдукционного слэба, выход на поверхность которого фиксируется в зоне ГУР.

Петрохимические и геохимические исследования позволили уточнить, а для кислых вулканитов — впервые установить петрохимическую сериальную принадлежность исследованных колчеданоносных комплексов (табл.).

Совокупность ранее полученных [Косарев и др., 2014] и новых петро-геохимических данных, а также сведений о юных и современных островодужных системах [Косарев, Серавкин, 1994; Косарев и др., 2014; Серавкин, 2010] позволяет уточнить ранее предложенную модель надсубдукционного вулканизма и колчеданообразования Магнитогорской мегазоны (рис. 8).

В течение эмско-раннеэфельского цикла вулканизма с запада на восток был создан следующий ряд колчеданоносных комплексов, обладающих определенными петро-геохимическими характеристиками: ивановский офиолитовый комплекс, расположенный в аккреционной зоне фронтальной островной дуги; комплексы фронтальной островной дуги: бурибайский контрастный базальт-риолитовый, включающий вулканиты бонинитовой и толеитовой островодужной серий; макан-октябрьский комплекс, принадлежащий к непрерывной базальт-андезит-риолитовой формации, сочетающей толеитовую островодужную и известково-щелочную серии вулканитов.

Подольский комплекс принадлежит к зоне развитой островной дуги, к гибридной базальт-андезитобазальт-андезит-риодацитовой формации,

вулканиты которой сочетают толеитовую островодужную, переходную от толеитовой к известково-щелочной и известково-щелочную петрохимические серии. Тыловую зону островной дуги представляют сукраковский и джусинский комплексы, относящиеся к непрерывно дифференцированной формации и включающие вулканиты шошонитовой серии с известково-щелочным уклоном. Наконец, наиболее восточный киембаевский комплекс, формировавшийся в задуговом бассейне, сложен базальтами толеитовой океанической серии.

Параллельно с геодинамической и петролого-геохимической зональностью в средней части пояса проявлена зональность в изменении типов колчеданных месторождений: Ni-Co-Cu-колчеданный (Ивановское и др. месторождения) → Cu-Zn-колчеданный (Cu > Zn, Юбилейное и Бурибайское, Маканское, Октябрьское, Подольское месторождения) → Ва-полиметаллически-колчеданный (Восточно-Подольское, Джусинское и Барсучий лог месторождения) → Cu-колчеданный (Летнее, Осеннее, Левобережное месторождения).

В течение позднего вулканического цикла (D_2ef_2 – zv) на границе развитой и тыловой частей островной дуги проявился спрединг и сформировались комплексы карамалыташской свиты и ее возрастных аналогов, образовавшие Бакрузяк-Сибайский и Учалинско-Александринский колчеданоносные пояса (см. рис. 8 и рис. 1).

Еще одним свидетельством справедливости предложенной модели (см. рис. 8) служат расстояния между колчеданными месторождениями в субширотной цепочке [Косарев, Серавкин, 1994]: Ивановское (Co-Cu-колчеданное) — Бурибаевское (Cu > Zn) — Макан-Октябрьское (Cu > Zn) — Подольское (Cu > Zn) — Восточно-Подольское (барит-полиметаллическое Zn-Cu-Pb), которые составляют 17 км, 11 км, 9 км, 5 км. Можно предположить, что тенденция с уменьшением расстояния между месторождениями, залегающими в разнотипных вулканических комплексах, омолаживающихся по возрасту в направлении падения палеозоны субдукции с запада на восток, связана с увеличением угла наклона погружающейся субдукционной плиты. Увеличение угла наклона, вероятно, связано с существенным возрастанием плотности плиты в результате эклогитизации базитов, что характерно для тыловых зон островных дуг [Рингвуд, 1981]. Этот процесс приводил к увеличению глубины зоны магмообразования и возрастанию калиевости и общей щелочности магм.

Таблица
Table
Типы вулканических серий кислых пород Магнитогорской мегазоны Южного Урала и их петрогенезис
Types of volcanic series of the Magnitogorsk megazone of the Southern Urals and their petrogenesis

| Рудные поля и районы Южного Урала | Петрохимические серии кислых пород | Характерные черты комплексов и химизма кислых пород | Петрогенетические процессы образования кислых пород |
|--|---|--|---|
| Бурибайский Ивановский | Умереннощелочная Известково-щелочная | Кислые породы завершают разрез бонинитовых вариолитов и бонинито-базальтов, риодациты: K_2O 0.1–1.24%; Na_2O 6.25–8.65%; Zr 47–84 г/г; Cr 11.5–84 г/г; вариолиты: SiO_2 64.7–74.36%; MgO 0.6–2.1; Na_2O 6.07–11.37; K_2O 0.04–3.4% | Ликвация толеит-бонинитовых магм Частичное плавление амфиболитов базальтовой коры |
| Баймакский Макан-Октябрьский Гайский | Известково-щелочная | В разрезе видно чередование дацитов и риодацитов с андезитами и андезибазальтами. Хорошо проявлен общий гомодромный характер эволюции расплавов. В кислых породах Баймакского района: Zr 67–122 г/г; Гайского района: Zr 40–93 г/г; присутствуют толеитовая и известково-щелочная серия базальтов и кислых пород | Кристаллизационная и флюидная дифференциация базальт-андезит-дацит – риодацит Частичное плавление амфиболитов |
| Суурганский Подольский | Переходная известково-щелочная – толеитовая | Не является дифференциатом базальтовой магмы, подстилаются и перекрываются базальт-андезибазальтовыми толщами | Частичное плавление амфиболитов, кристаллизационная дифференциация, гибрилизм |
| Кунакайский | Толеитовая | Кислые породы залегают в основании антитропной серии ($H_{r,2}$) ферродацит-андезит-андезибазальт-пироксенпорфировый базальт. В дацитах Zr 30–96 г/г | Кристаллизационная дифференциация |
| Сураковский Джусинский | Известково-щелочная Шошонитовая | Сураковский комплекс: преобладают дациты и риодациты повышенной щелочности Na и K-Na типов. Джусинский комплекс: тефриты – шошониты – лагиты – трахиты – трахидациты. В кислых породах: SiO_2 68.24–70.13%; Na_2O 2.49–7.71; K_2O 3.1–5.9; MgO 1–1.97%; Cr 18–31 г/г; Pb 14.3; Rb 54–83; Sr 81–101; Zr 114–355; Va 428; La 11–31; Yb 2.3 г/г | Кристаллизационная дифференциация шошонитовых базальтовых магм с глубокими очагами в флогопитовой зоне верхней мантии. Андерлгейтинг, выплавление кислых маг из нижней базальтовой коры |
| Карамальташский | Толеитовая Известково-щелочная | Зона внутридугового спрединга, базальты толеитовой островодужной серии. Кислые породы: Zr 48–119 г/г; Al_2O_3 10.3–13%; La 1.9–4.38 г/г; Yb 2.28–5.24 г/г; La/Yb 0.55–1.4, обогащение Yb . Восходящий характер графиков порола/хондрит | Частичное плавление амфиболитов, кристаллизационная дифференциация, гибрилизм |
| Александринский | Толеитовая Известково-щелочная умереннощелочная | Зона внутридугового спрединга, тыловая часть. Кислые породы: Zr 21–238 г/г; Al_2O_3 10–18%. Нисходящий характер графиков порола/хондрит | Кристаллизационная дифференциация Частичное плавление амфиболитов |



Рис. 8. Модель надсубдукционного позднеэмского-позднеэйфельского вулканизма Магнитогорской мегазоны

Условные обозначения: 1 — зоны магмогенерации в мантийном клине; 2 — серпентинитовый меланж; 3–11 — базальтовые магмы, исходные для петрогенетических серий и соответствующих магматических комплексов: 3 — шшонитовая серия, мостостроевский комплекс (D_1e_1); 4 — бонинитовая серия, бурибайский комплекс (D_1e_2); 5 — известково-щелочная серия, верхнетаналыкский комплекс (D_1e_3); 6 — известково-щелочная и толеитовая серии, ирендыкский комплекс (D_2ef_1); 7 — шшонитовая серия с известково-щелочным уклоном, сукраковский и джусинский комплексы (D_2ef_1); 8 — толеитовая островодужная серия, карамалыташский комплекс и его возрастные аналоги (D_2ef_2); 9 — кремнекислые породы в составе карамалыташского комплекса; 10 — базальты субконтинентальные, джаилганский комплекс (D_1e_2), и базальты субокеанические, киэмбаевский комплекс (D_1e_2); 11 — субщелочные базальты в составе карамалыташского комплекса (D_2ef_2); 12 — кристаллические сланцы Восточно-Уральского микроконтинента; 13 — очаги базальтовых и кислых магм на границе нижняя кора – верхняя мантия; 14 — поднимающиеся мантийные диапиры; 15 — субдукционные флюиды; 16 — предполагаемые области генерации магм: Ш — шшонитовая, ИЩ — известково-щелочная, УЩ — умеренно-щелочная, УЩП — умеренно-щелочная переходная между толеитовой субокеанической и умереннощелочной субконтинентальной, УЩСОК — умеренно-щелочная субокеаническая, УЩСК — умереннощелочная субконтинентальная, ТСОК — толеитовая субокеаническая, ТОД — толеитовая островодужная. **Сокращения:** 3 — зоны, мегазоны; М — металлогенетические типы руд; ГД — геодинамические обстановки; ВУП — Восточно-Уральское поднятие.

Fig. 8. Model of the suprasubduction Late-emsian-Late-eifelian volcanicity of the Magitogorsk megazone

Legend: 1 — zones of magmogenesis in the mantle wedge; 2 — serpentinite melange; 3–11 — basaltic magmas, initial for petrogenetic series and corresponding magmatic complexes: 3 — shoshonite series, Mostostroy complex (D_1e_1); 4 — boninite series, the Buribay complex (D_1e_2); 5 — calc-alkaline series, Verhnetanalyk complex (D_1e_3); 6 — calc-alkaline and tholeiitic series, Irendyk complex (D_2ef_1); 7 — shoshonite series with calc-alkaline slope, Sukrakov and Dzhusa complex (D_2ef_1); 8 — tholeiite island-arc series, Karamalytash complex and its age analogues (D_2ef_2); 9 — silicic rocks in the the Karamalytash complex; 10 — subcontinental basalts, Jailgan complex (D_1e_2) and suboceanic basalts, Kiembay complex (D_1e_2); 11 — subalkaline basalts in the Karamalytash complex (D_2ef_2); 12 — crystalline schists of the East Uralian microcontinent; 13 — foci of basaltic and acid magmas at the lower crust / upper mantle boundary; 14 — ascending mantle diapirs; 15 — subduction fluids; 16 — proposed magma generation areas: Ш — shoshonite, ИЩ — calc-alkaline, УЩ — moderately alkaline, УЩП — moderately alkaline transition between tholeiitic sub-oceanic and moderately alkaline subcontinental, УЩСОК — moderately alkaline sub-oceanic, УЩСК — moderate-alkaline subcontinental, ТСОК — tholeiitic suboceanic, ТОД — tholeiite island arc. **Abbreviations:** 3 — zones, megazones; М — metallogenetic types of ores; ГД — geodynamic settings; ВУП — East Ural uplift.

Таким образом, в течение раннего ($D_1e_2-D_2ef_1$) цикла вулканизма под воздействием погружающегося на восток слэба сформировалась широтная зональность Магнитогорской мегазоны (см. рис. 8).

Наряду с широтной палеовулканической и металлогенетической зональностью имеет место и продольная меридиональная зональность, наиболее ярко проявившаяся в Тубинско-Гайском поясе.

Здесь она выражена в уменьшении общих запасов руд с юга на север от Гайского суперкрупного месторождения к Бурибай-Маканскому и далее к Баймакскому району с большим количеством мелких объектов. Эта закономерность связана с изменением состава коры, увеличением мощности гранитно-метаморфического слоя с юга на север за счет уменьшения мощности нижней базальтовой коры [Серавкин, Цветкова, 1986] (рис. 9).

Изменение состава и строения коры, вероятно, сопровождалось и изменением угла наклона слэба, от наиболее крутого на юге зоны до пологого в ее северной части, что способствовало рассредоточению оруденения (рис. 10).

Критерии колчеданосности

Рассмотренные закономерности позволяют сформулировать критерии колчеданосности. К формационным критериям относится известная связь оруденения с дифференцированными формациями (контрастной и непрерывной). Авторами

установлено, что продуктивность комплексов прямо коррелируется с проявлением в них толеитовых тенденций (рис. 11). Таким образом, структурно-палеовулканические (широтная и меридиональная зональность поясов), петролого-геохимические (серийная принадлежность рудоносных комплексов) факторы тесно взаимосвязаны и служат критериями колчеданосности (см. рис. 11). Конкретным геохимическим критерием, впервые сформулированным в последний период, является увеличение в базальтах рудоносных комплексов отношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ и уменьшение содержаний TiO_2 , Zr, PЗЭ и отношения La/Yb .

Заключение

В результате исследований, проведенных в последнее время в Тубинско-Гайском поясе, получены новые петро-геохимические данные, позволившие уточнить ранее разработанную авторами серийную принадлежность всех колчеданосных комплексов Магнитогорской мегазоны

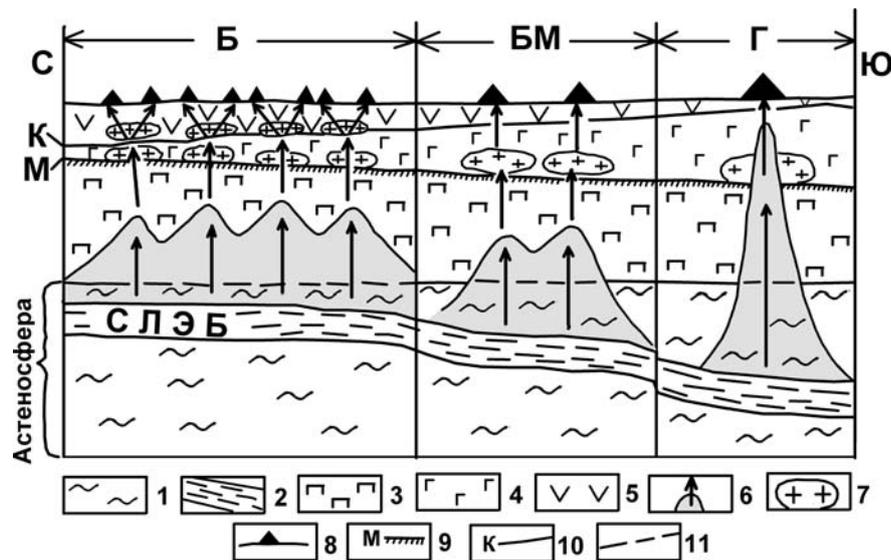


Рис. 9. Модель формирования продольной зональности колчеданосного пояса (на примере Тубинско-Гайского пояса), вертикальный масштаб искажен

Условные обозначения: 1 — астеносфера, 2 — погружающийся слэб, 3 — верхняя мантия (перидотиты), 4 — нижняя кора (гранулитобазитовый слой), 5 — верхняя кора (гранитно-метаморфический слой), 6 — мантийные диапиры и пути подъема магм и гидротермальных растворов, 7 — очаги базальтовых и кислых магм, 8 — рудоносные вулканические постройки, 9 — граница Мохоровичича, 10 — раздел Конрада, 11 — верхняя граница астеносферы. Поперечные блоки (и рудные районы): Б — Баймакский, БМ — Бурибай-Маканский, Г — Гайский.

Fig. 9. Model of the formation of longitudinal zonation of the massive sulphide-bearing belt (at the example of the Tubinsk-Gai belt), the vertical scale is distorted

Legend: 1 — asthenosphere, 2 — submerged slab, 3 — upper mantle (peridotites), 4 — lower crust (granulite-basite layer), 5 — upper crust (granite-metamorphic layer), 6 — mantle diapirs and ways of lifting magmas and hydrothermal solutions, 7 — foci of basaltic and acidic magmas, 8 — ore-bearing volcanic structures, 9 — Mohorovichich boundary, 10 — Conrad section, 11 — upper boundary of the asthenosphere. Transverse blocks (and ore areas): Б — Baymak, БМ — Buribai-Makan, Г — Gai.

Южного Урала и впервые определить сериальную принадлежность кремнекислых пород этих комплексов.

Важное научное и практическое значение имеет разработка ранее предложенной авторами оригинальной модели субдукционного развития вулканизма и колчеданообразования Магнитогорской мегазоны. Эта модель определяет широтную зональность Магнитогорской мегазоны в результате восточного погружения слэба. В течение

2 циклов вулканизма были сформированы следующие комплексы: I — в период $D_1e_2 - D_2ef_1$ (с запада на восток): 1) ультрабазит-базальт-риолитовый, зоны ГУР, с оруденением ивановского типа (Ni-Co-Cu), 2) базальт-риолитовый и базальт-андезит-риолитовый, фронтальной островной дуги, с оруденением уральского (Cu-Zn) и баймакского (Au-Ba-Pb-Cu-Zn) типов, 3) базальт-андезит-базальтовый, развитой островной дуги, рудоносной в южной части в гибридном дифференцированном

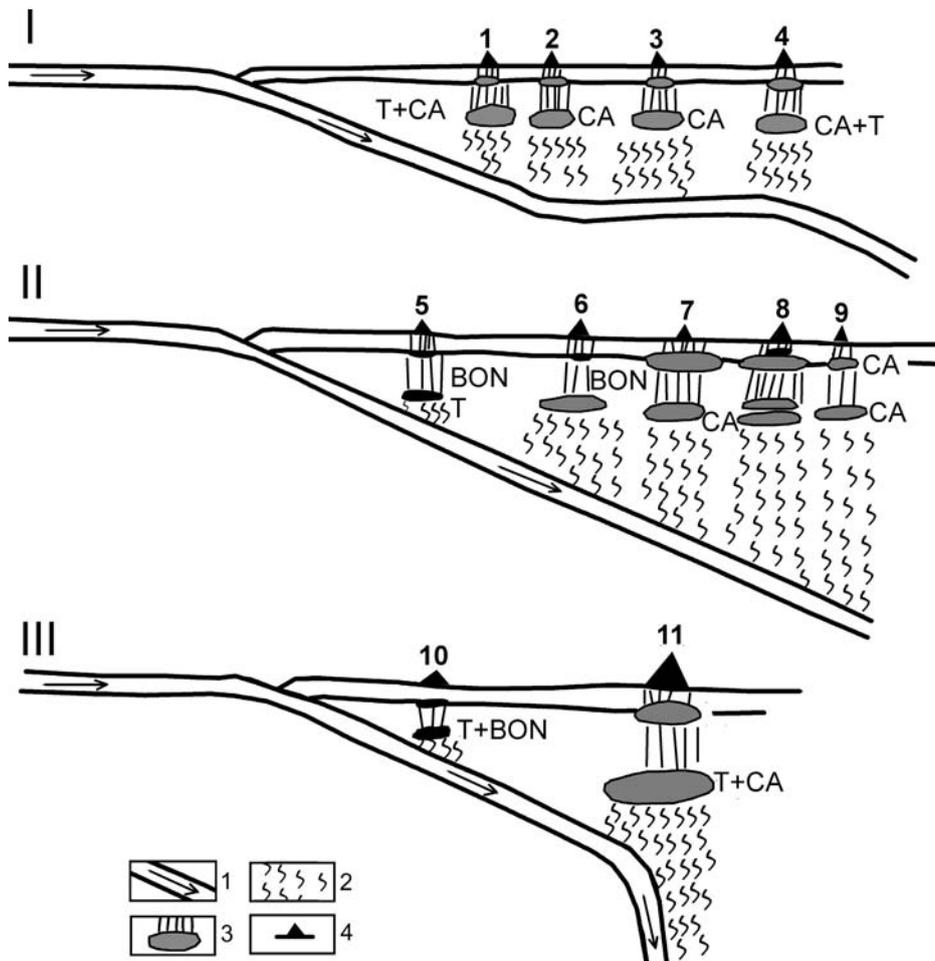


Рис. 10. Модель геодинамического развития рудных районов Тубинско-Гайского палеовулканического пояса на позднеэмско-раннеэйфельском этапе

Условные обозначения: 1 — погружающийся слэб, 2 — потоки субдукционных флюидов, 3 — очаги магнеобразования, 4 — рудоносные вулканические постройки. **Петрогенетические серии:** Т — толеитовая островодужная, BON — бонинитовая, СА — известково-щелочная. **Рудные районы:** I — Баймакский, II — Бурибай-Макан-Подольский, III — Гайский. **Месторождения:** 1 — Бакр-тау, 2 — Таш-тау, 3 — Юлалы, 4 — Балта-тау, 5 — Дергамышское, 6 — Бурибай, 7 — Макан, 8 — Подольское, 9 — Восточно-Подольское, 10 — Ишкининское, 11 — Гайское.

Fig. 10. Model of geodynamic development of ore areas of the Tubinsk-Gai Paleovolcanic belt at the Late Emsian–Early Eifelian stage

Legend: 1 — submerged slab, 2 — flows of subduction fluids, 3 — foci of magma formation, 4 — ore-bearing volcanic structures. **Petrogenetic series:** T — tholeiitic island arc, BON — boninitic, CA — calc-alkaline. **Ore regions:** I — Baimak, II — Buribai-Makan-Podolsk, III — Gai. **Deposits:** 1 — Bakr-tau, 2 — Tash-tau, 3 — Yulaly, 4 — Balta-tau, 5 — Dergamysh, 6 — Buribay, 7 — Makan, 8 — Podolsk, 9 — East Podolsk, 10 — Ishkinino, 11 — Gai.

| №№ пп | Рудовмещающие комплексы | Возраст | Формация | Петрохимическая серия | Тип оруденения | Запасы в вулканических комплексах Cu+Zn в тыс. т [Рудно-формационный..., 2001] | | | | | |
|----------|----------------------------|--|-----------------|--------------------------|-------------------|--|------|------|------|------|---|
| | | | | | | 10000 | 8000 | 6000 | 4000 | 2000 | 0 |
| 1 | Ивановский | D ₁ e | У+Б-Р | ДГ+Т-БОН | Co-Cu | 80 | | | | | |
| 2 | Бурибайский | D ₁ e ₂ ¹ | Б-Р | Т-БОН-ИЩ | Cu>Zn | 2810 | | | | | |
| 3 | Баймакский | D ₁ e ₂ ² | Б-А-Д-Р | ИЩ | Zn>Cu+Au | 1047 | | | | | |
| 4 | Маканский | D ₁ e ₂ ² | Б-А-Д-Р | ИЩ-ГОД | Cu>Zn | 700 | | | | | |
| 5 | Гайский | D ₁ e ₂ | Б-Р, Б-А-Д-Р | ИЩ-ТОД-БОН ? | Cu>Zn | 10041 | | | | | |
| 6 | Подольский | D ₂ ef ₁ ¹ | Б-Р,Б-А-Д-Р (г) | ТОД-ПИЩ | Cu>Zn | 3070 | | | | | |
| 7 | Джусинский | D ₂ ef ₁ | Б-А-Д-Р | ШОШ-ИЩ | Zn-Cu-Pb | 657 | | | | | |
| 8 | Восточно-Подольский | D ₂ ef ₁ ² | ТД-Р | ПИЩ-ШОШ | Zn-Cu-Pb | 164 | | | | | |
| 9 | Домбаровский | D ₁ e | Б | ТО | Cu | 1372 | | | | | |
| 10 | Учалинский | D ₂ ef ₂ ¹ | Б-Р | ТОД | Zn>Cu | 9542 | | | | | |
| 11 | Сибайский | D ₂ ef ₂ ² | Б-Р | ТОД | Zn>Cu | 2927 | | | | | |
| 12 | Верхнеуральский | D ₂ ef ₂ ² -zv ₁ | Б-А-Д-Р | ПТОД-ИЩ | Zn>Cu+Pb | 6900 | | | | | |
| 13 | Александринский | D ₂ ef ₁ | Б-Р | ТОД-ИЩ-СЩ | Zn-Cu-Pb | 559 | | | | | |
| | | | | | | 10000 | 8000 | 6000 | 4000 | 2000 | 0 |
| | | | | | | тысяч тонн | | | | | |

Рис. 11. Рудовмещающие комплексы и колчеданное оруденение Магнитогорской мегазоны Южного Урала

Сокращенные названия, формации: У — ультрабазитовая, Б-Р — базальт-риолитовая, Б-А-Д-Р — базальт-андезит-дацит-риолитовая, (г) — гибридная, ТД-Р — трахидацит-риолитовая, Б — базальтовая. **Петрохимические серии:** ДГ — дунит-гарцбургитовая, Т — толеитовая, БОН — бонинитовая, ИЩ — известково-щелочная, ТОД — толеитовая островодужная, ПИЩ — переходная от известково-щелочной к шохонитовой, ШОШ — шохонитовая, ТО — толеитовая океаническая, ПТОД — переходная от толеитовой островодужной к известково-щелочной, СЩ — субщелочная.

Fig. 11. Ore-bearing complexes and pyrite mineralization of the Magnitogorsk megazone of the Southern Urals

Abbreviated names, formations: U — ultrabasic, B-R — basalt-rhyolite, B-A-D-R — basalt-andesite-dacite-rhyolite, (r) — hybrid, TD-R — trachydacite-rhyolite, B — basalt. **Petrochemical series:** DG — dunite-harzburgitic, T — tholeiitic, BON — boninitic, ISS — calc-alkaline, TOD — tholeiitic island-arc, PISS — transitional from calc-alkaline to shoshonite, SHOSh — shoshonite, TO — tholeiitic oceanic, PTOD — transitional from tholeiitic island-arc to calc-alkaline, SS — subalkaline.

комплексе, с оруденением уральского типа (Cu-Zn), 4) базальт-андезит-риолитовые тыловой островной дуги, с оруденением полиметаллического (Ba-Pb-Zn-Cu) типа, 5) базальтовый, задугового спрединга, с оруденением медноколчеданного типа; II — во втором цикле (D₂ef₂¹–D₃f) в результате рифтогенеза и спрединга произошел разрыв островной дуги и сформировались базальт-риолитовые комплексы с оруденением уральского типа (с преобладанием Zn над Cu) и более поздние комплексы базальт-андезит-риолитового состава с Zn-Cu оруденением, переходным к полиметаллическому.

Установленные закономерности изменения состава рудовмещающих комплексов, состава и объемов колчеданного оруденения позволили сформулировать критерии колчеданности, применение которых должно способствовать эффективности поисков новых месторождений. Основные критерии следующие.

1. Наиболее продуктивны на колчеданные руды вулканогенные дифференцированные комплексы с широким развитием толеитовых базальтов.

2. Продуктивность дифференцированных вул-

каногенных комплексов повышается с ростом Na₂O/K₂O отношения и уменьшением содержаний TiO₂, Zr, P3Э и отношения La/Yb в базальтах.

Работа выполнена в соответствии с госзаказом № 0252-2017-0011.

Список литературы:

Аржавитина М.Ю. Петрографическая и петрохимическая характеристика пород Юбилейного месторождения // Петрология горных пород, вмещающих сульфидные месторождения Южного Урала. — Уфа, 1971. — С. 43–53.

Арт Дж.Г. Некоторые элементы-примеси в трондьемитах — их значение для выяснения генезиса магмы и палеотектонических условий // Трондьемиты, дациты и связанные с ними породы / Под ред Ф. Баркера. — М.: Мир, 1983. — С. 99–105.

Бородаевская М.Б., Кривоцов А.И., Ширай Е.П. Изменения раннегеосинклинального вулканизма по латерали в связи с проблемой колчеданности // Латеральные ряды магматических формаций. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1979. — С. 22–44.

Вулканизм Южного Урала / И.Б. Серавкин, А.М. Косарев, Д.Н. Салихов, С.Е. Знаменский, З.И. Родичева, М.В. Рыкус, В.И. Сначев. — М.: Наука, 1992. — 197 с.

Вулканогенная металлогения Южного Урала / И.Б. Серавкин, С.Е. Знаменский, А.М. Косарев, М.В. Рыкус, Д.Н. Салихов, В.И. Сначев, В.М. Мосейчук. — М.: Наука, 1994. — 160 с.

Колчеданные месторождения Баймакского рудного района / П.Ф. Сопко, М.И. Исмагилов, И.Б. Серавкин, Л.Н. Сопко. — М.: Наука, 1973. — 224 с.

Косарев А.М. Магнезиальные базальты и бонинитовые вариолиты баймак-бурибаевской свиты (Южный Урал) // Геология и перспективы расширения сырьевой базы Башкортостана и сопредельных территорий. — Уфа, 2001. — Т. 1. — С. 227–240.

Косарев А.М. Геология и геохимические особенности раннепалеозойских вулканитов Сакмарской и Вознесенско-Присакмарской зон на Южном Урале // Литосфера. — 2015. — № 2. — С. 40–64.

Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б. Петролого-геохимические особенности раннедевонско-эйфельских островодужных вулканитов Магнитогорской зоны в геодинамическом контексте // Литосфера. — 2005. — № 4. — С. 22–42.

Косарев А.М., Серавкин И.Б. Колчеданоносные островные дуги Южного Урала и модель малоглубинных плюмов // Металлогения складчатых систем с позиций тектоники плит: Тез. докл. I Всерос. металлург. совещ. — Екатеринбург, 1994. — С. 197–198.

Косарев А.М., Серавкин И.Б. Колчеданообразующие рудно-магматические системы Уральского, Баймакского и Домбаровского типов на Южном Урале: петролого-геохимические и геодинамические аспекты // Магматизм и рудообразование: Матер. конф., посвященной 125-летию со дня рождения акад. А.Н. Заварицкого. — М.: ИГЕМ РАН, 2009. — С. 207–211.

Косарев А.М., Серавкин И.Б., Холоднов В.В. Геодинамические и петролого-геохимические аспекты зональности Магнитогорской колчеданоносной мегазоны на Южном Урале // Литосфера. — 2014. — № 2. — С. 3–25.

Кузьмин М.И., Кабанова Л.Я. Бонинитовые серии Южного Урала: геологическое и петрографическое описание, особенности состава и проблемы происхождения // Потенциальная рудоносность, геохимические типы и формации магматических пород. — Новосибирск: Наука, 1991. — С. 156–173.

Маллас Дж. Две контрастирующие трондьемитовые ассоциации из перемещенных офиолитов в западном Ньюфаундленде: первое сообщение // Трондьемиты, дациты и связанные с ними породы / Под ред. Ф. Баркера. — М.: Мир, 1983. — С. 339–353.

Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. — 200 с.

Петрология и геохимия островных дуг и окраинных морей / Под ред. О.А. Богатикова, Ю.И. Дмитриева, А.А. Цветкова. — М.: Наука, 1987. — 335 с.

Прокин В.А., Буслаев Ф.П., Виноградов А.М., Молошаг В.П., Кузнецов С.И. Гайский ГОК; Геология Гайского и Подольского медно-цинковых колчеданных месторождений на Урале. — Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. — 148 с.

Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. — М.: Недра, 1981. — 584 с.

Рудно-формационный и рудно-фациальный анализ колчеданных месторождений Уральского палеоокеана / В.В. Зайков, В.В. Масленников, Е.В. Зайкова, Р. Херрингтон. — Миасс: ИМин УрО РАН, 2001. — 315 с.

Серавкин И.Б. Вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала. — М.: Наука, 1986. — 268 с.

Серавкин И.Б. Вулканогенные колчеданные месторождения Южного Урала // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование: Сборник науч. трудов. — Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. — С. 638–669.

Серавкин И.Б. Металлогения Южного Урала и Центрального Казахстана. — Уфа: Гилем, 2010. — 284 с.

Серавкин И.Б., Косарев А.М. О происхождении контрастных и непрерывных серий базальт-липаритовой формации Южного Урала // Докл. АН СССР. — 1979. — Т. 245, № 5. — С. 1210–1214.

Серавкин И.Б., Косарев А.М. Палеовулканическая история формирования Подольского рудного поля и месторождения (Южный Урал) // Геология рудных месторождений. — 1983. — Т. 25, № 5. — С. 72–86.

Серавкин И.Б., Косарев А.М., Пучков В.Н. Геодинамические условия формирования колчеданных месторождений Магнитогорской мегазоны Южного Урала и критерии для их поисков // Геология рудных месторождений. — 2017. — Т. 59, № 3. — С. 220–237. — doi.org/10.7868/s0016777017030054

Серавкин И.Б., Скуратов В.Н. Гайское медноколчеданное месторождение: структура, зональность и распределение золота и серебра в рудах // Литосфера. — 2009. — № 4. — С. 66–82.

Серавкин И.Б., Цветкова А.А. Типы колчеданоносных районов Магнитогорского мегасинклинория в связи с его глубинным строением // Глубинные условия эндогенного рудообразования / Отв. ред. акад. В.И. Смирнов. — М.: Наука, 1986. — С. 157–172.

Симонов В.А., Золотухин В.В., Ковязин С.В., Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. Петрогенезис базальтовых серий подводного плато Онтонг Джава-Науру, Тихий океан // Петрология. — 2004. — Т. 12, № 2. — С. 191–205.

Среднепалеозойский вулканизм Башкирского Зауралья и связь с ним колчеданного оруденения / П.Ф. Сопко, И.Б. Серавкин, А.С. Бобохов, А.М. Косарев. — Уфа: БФАН СССР, 1983. — 116 с.

Трондьемиты, дациты и связанные с ними породы / Под ред. Ф. Баркера. — М.: Мир, 1983. — 488 с.

Chistyakova S.Yu., Latypov R.M. Small Dacite Dyke, Southern Urals, Russia: Rapidly Quenched Liquid or Fine-Grained Cumulate? // Dyke Swarms: Keys for Geodynamic Interpretation. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011. — P. 569–581. — doi.org/10.1007/978-3-642-12496-9_29.

Pearce J.A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins // Continental basalts and mantle xenoliths / C.J. Hawkesworth, M.J. Norry (eds.) — Shiva. Nantwich, 1983. — P. 230–249.

Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks // Journal of Petrology. — 1984. — V. 25, No. 4. — P. 956–983. — doi.org/10.1093/petrology/25.4.956.

Spadea P., Kabanova L., Scarrow J.H. Petrology, geochemistry and geodynamic significance of Mid-Devonian boninitic rocks from the Baimak-Buribai area (Magnitogorsk zone, Southern Urals) // Ofioliti. — 1998. — V. 23, No. 1. — P. 17–36.

Spadea P., D'Antonio M., Kosarev A., Gorozhanina Y., Brown D. Arc-Continent Collision in the Southern Urals: Petro-

genetic Aspects of the Forearc-Arc Complex // Mountain building in the Uralides: Pangea to the present. – Geophysical Monograph, 132. – Washington, 2002. – P. 101–134. – doi.org/10.1029/132gm07.

References:

Arzhavitina M. Yu. Petrograficheskaya i petrohimicheskaya kharakteristika porod Yubileinogo mestorozhdeniya [Petrographic and petrochemical characteristics of the rocks of the Jubileynoe deposit] // Petrologiya gornyh porod, vmeshchayushchih sul'fidnye mestorozhdeniya Yuzhnogo Urala. Ufa, 1971. P. 43–53 (in Russian).

Art Dzh. G. Nekotorye elementy-primesi v trond'emitah – ih znachenie dlya vyyasneniya genezisa magmy i paleotektonicheskikh uslovii [Some impurity elements in trondhjemites and their significance for elucidating the genesis of magma and paleotectonic conditions] // Trond'emity, datsity i svyazannye s nimi porody / Ed. F. Barker. M.: Mir, 1983. P. 99–105 (in Russian).

Borodaevskaya M. B., Krivtsov A. I., Shirai E. P. Izmeneniya rannegeosinklinal'nogo vulkanizma po laterali v svyazi s problemoi kolchedanonosnosti [Lateral changes in early geosynclinal volcanism in connection with the problem of massive sulfide ore productivity] // Lateral'nye ryady magmaticheskikh formatsii. Sverdlovsk: UNTS AN SSSR, 1979. P. 22–44 (in Russian).

Chistyakova S. Yu., Latypov R. M. Small Dacite Dyke, Southern Urals, Russia: Rapidly Quenched Liquid or Fine-Grained Cumulate? // Dyke Swarms: Keys for Geodynamic Interpretation. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 569–581. – doi.org/10.1007/978-3-642-12496-9_29.

Kolchedannye mestorozhdeniya Baimakskogo rudnogo raiona [The massive sulfide deposits of the Baimak ore district] / P. F. Sopko, M. I. Ismagilov, I. B. Seravkin, L. N. Sopko. M.: Nauka, 1973. 224 p. (in Russian).

Kosarev A. M. Magnezial'nye bazal'ty i boninitovye variolity baimak-buribaevskoi svity (Yuzhnyi Ural) [Magnesian basalts and boninite variolites of the Bymak-Buribay Formation (Southern Urals)] // Geologiya i perspektivy rasshireniya syr'evoi bazy Bashkortostana i sopredel'nyh territorii. Ufa, 2001. V. 1. P. 227–240 (in Russian).

Kosarev A. M. Geologiya i geokhimicheskie osobennosti rannepaleozoiskikh vulkanitov Sakmarskoi i Voznesensko-Prisakmarskoi zon na Yuzhnom Urale [Geology and geochemical features of the Early Paleozoic volcanics of the Sakmara and Voznesensk-Prisakmar zones in the Southern Urals] // Litosfera. 2015. No. 2. P. 40–64 (in Russian).

Kosarev A. M., Puchkov V. N., Seravkin I. B. Petrologo-geokhimicheskie osobennosti rannedevonsko-eifel'skikh ostrovoduzhnykh vulkanitov Magnitogorskoi zony v geodinamicheskom kontekste [Petrologico-geochemical features of the Early Devonian-Eifelian island arc volcanics of the Magnitogorsk zone in the geodynamic context] // Litosfera. 2005. No. 4. P. 22–42 (in Russian).

Kosarev A. M., Seravkin I. B. Kolchedanonosnye ostrovnye dugi Yuzhnogo Urala i model' maloglubinnykh plyumov [The massive sulfide-bearing island arcs of the Southern Urals and the shallow plume model] // Metallogeniya skladchatykh sistem s pozitsii tektoniki plit: Tez. dokl. I Vseros. Metallog. soveshch. Ekaterinburg, 1994. P. 197–198 (in Russian).

Kosarev A. M., Seravkin I. B. Kolchedanoobrazuyushchie rudno-magmaticheskie sistemy Ural'skogo, Baimakskogo i Dombarovskogo tipov na Yuzhnom Urale: petrologo-geokhimicheskie

i geodinamicheskie aspekty [The massive sulfide pyrite-forming ore-magmatic systems of the Ural, Baimak and Dombarov types in the Southern Urals: petrologic-geochemical and geodynamic aspects] // Magmatizm i rudoobrazovanie: Mat. konf., posvyashchenoi 125-letiyu so dnya rozhdeniya akad. A. N. Zavaritskogo. M.: IGEM RAN, 2009. P. 207–211 (in Russian).

Kosarev A. M., Seravkin I. B., Kholodnov V. V. Geodinamicheskie i petrologo-geokhimicheskie aspekty zonal'nosti Magnitogorskoi kolchedanonosnoi megazony na Yuzhnom Urale [Geodynamic and petrological-geochemical aspects of the zonation of the Magnitogorsk massive sulfide-bearing megazone in the Southern Urals] // Litosfera. 2014. No. 2. P. 3–25 (in Russian).

Kuz'min M. I., Kabanova L. Ya. Boninitovye serii Yuzhnogo Urala: geologicheskoe i petrograficheskoe opisanie, osobennosti sostava i problemy proiskhozhdeniya [Boninite series of the Southern Urals: geological and petrographic description, problems of composition and origin] // Potentsial'naya rudonosnost', geokhimicheskie tipy i formatsii magmaticheskikh porod. Novosibirsk: Nauka, 1991. P. 156–173 (in Russian).

Malpas Dzh. Dve kontrastiruyushchie trond'emitovye assotsiatsii iz peremeshchennykh ofiolitov v zapadnom N'yufaundlende: pervoe soobshchenie [Two contrasting trondhjemite associations from displaced ophiolites in western Newfoundland: the first report] // Trond'emity, dacity i svyazannye s nimi porody / Ed. F. Barker. M.: Mir, 1983. P. 339–353 (in Russian).

Pearce J. A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins // Continental basalts and mantle xenoliths / C. J. Hawkesworth, M. J. Norry (eds.) – Shiva. Nantwich, 1983. – P. 230–249.

Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks // Journal of Petrology. – 1984. – V. 25, No. 4. – P. 956–983. – doi.org/10.1093/petrology/25.4.956.

Petrograficheskii kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya [Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formation]. SPb.: VSEGEI, 2008. 200 p. (in Russian).

Petrologiya i geokhimiya ostrovnykh dug i okrainnykh morei [Petrology and geochemistry of island arcs and marginal seas] / Eds. O. A. Bogatkov, Yu. I. Dmitriev, A. A. Tsvetkov. M.: Nauka, 1987. 335 p. (in Russian).

Prokin V. A., Buslaev F. P., Vinogradov A. M., Moloshag V. P., Kuznetsov S. I. Gaiskii GOK; Geologiya Gaiskogo i Podol'skogo medno-tsinkovykh kolchedannykh mestorozhdenii na Urale [Gaisky GOK; Geology of Gai and Podolsk copper-zinc massive sulfide deposits in the Urals]. Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 2004. 148 p. (in Russian).

Ringvud A. E. Sostav i petrologiya mantii Zemli [Composition and petrology of the Earth's mantle]. M.: Nedra, 1981. 584 p. (in Russian).

Rudno-formatsionnyi i rudno-fatsial'nyi analiz kolchedannykh mestorozhdenii Ural'skogo paleookeana [Ore-formation and ore-facies analysis of massive sulfide deposits of the Uralian paleocean] / V. V. Zaikov, V. V. Maslennikov, E. V. Zaikova, R. Herrington. Miass: IMin UrO RAN, 2001. 315 p. (in Russian).

Seravkin I. B. Vulkanizm i kolchedannye mestorozhdeniya Yuzhnogo Urala [Volcanism and massive sulfide deposits of the Southern Urals]. M.: Nauka, 1986. 268 p. (in Russian).

Seravkin I. B. Vulkanogennye kolchedannye mestorozhdeniya Yuzhnogo Urala [Volcanogenic massive sulfide deposits of the Southern Urals] // Geodinamika, magmatizm, metamorfizm

i rudoobrazovanie: Sbornik nauch. trudov. Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 2007. P. 638–669 (in Russian).

Seravkin I.B. Metallogeniya Yuzhnogo Urala i Central'nogo Kazakhstana [Metallogeny of the Southern Urals and Central Kazakhstan]. Ufa: Gilem, 2010. 284 p. (in Russian).

Seravkin I.B., Kosarev A.M. O proiskhozhdenii kontrastnykh i nepreryvnykh seriy bazal't-liparitovoi formatsii Yuzhnogo Urala [On the origin of contrasting and continuous series of the basalt-rhyolite formation of the Southern Urals] // Dokl. AN SSSR. 1979. V. 245, No. 5. P. 1210–1214 (in Russian).

Seravkin I.B., Kosarev A.M. Paleovulkanicheskaya istoriya formirovaniya Podol'skogo rudnogo polya i mestorozhdeniya (Yuzhnyi Ural) [Paleovolcanic history of formation of the Podolsk ore field and deposit (Southern Ural)] // Geologiya rudnykh mestorozhdenii. 1983. V. 25, No. 5. P. 72–86 (in Russian).

Seravkin I.B., Kosarev A.M., Puchkov V.N. Geodynamic conditions of formation of massive sulfide deposits in the Magnitogorsk Megazone, Southern Urals, and prospection criteria // Geology of Ore Deposits. 2017. V. 59, No. 3. P. 227–243. — doi. org/10.1134/s1075701517030059.

Seravkin I.B., Skuratov V.N. Gaiskoe mednokolchedannoe mestorozhdenie: struktura, zonal'nost' i raspredelenie zolota i serebra v rudakh [Gai copper-massive sulfide deposit: structure, zoning and distribution of gold and silver in ores] // Litosfera. 2009. No. 4. P. 66–82 (in Russian).

Seravkin I.B., Tsvetkova A.A. Tipy kolchedanonosnykh raionov Magnitogorskogo megasinclonoriya v svyazi s ego glubinnym stroeniem [Types of the massive sulfide-bearing regions of the Magnitogorsk megasinclonorium in connection with its deep structure] // Glubinnye usloviya endogennoego rudoobrazovaniya / Ed. V.I. Smirnov. M.: Nauka, 1986. P. 157–172 (in Russian).

Simonov V.A., Zolotukhin V.V., Kovyazjn S.V., Al'mukhamedov A.I., Medvedev A.Ya. Petrogenesis of Basaltic Series of the Ontong Java Oceanic Plateau and the Nauru Basin, Pacific Ocean // Petrology. 2004. V. 12, No. 2. P. 163–175 (in Russian).

Spadea P., Kabanova L., Scarrow J.H. Petrology, geochemistry and geodynamic significance of Mid-Devonian boninitic rocks from the Baimak-Buribai area (Magnitogorsk zone, Southern Urals) // Ofioliti. — 1998. — V. 23, No. 1. — P. 17–36.

Spadea P., D'Antonio M., Kosarev A., Gorozhanina Y., Brown D. Arc-Continent Collision in the Southern Urals: Petrogenetic Aspects of the Forearc-Arc Complex // Mountain building in the Uralides: Pangea to the present. — Geophysical Monograph, 132. — Washington, 2002. — P. 101–134. — doi. org/10.1029/132gm07.

Srednepaleozoiskii vulkanizm Bashkirskogo Zaural'ya i svyaz' s nim kolchedannogo orudneniya [The Middle Paleozoic volcanism of the Bashkirian Trans-Urals and its connection with massive sulfide mineralization] / P.F. Sopko, I.B. Seravkin, A.S. Bobohov, A.M. Kosarev. Ufa: BFAN SSSR, 1983. 116 p. (in Russian).

Trond'emity, dacity i svyazannyye s nimi porody [Trondhjemites, dacites and associated rock types] / Ed. F. Barker. M.: Mir, 1983. 488 p. (in Russian).

Vulkanizm Yuzhnogo Urala [Volcanism of the Southern Urals] / I.B. Seravkin, A.M. Kosarev, D.N. Salikhov, S.E. Znamenskiy, Z.I. Rodicheva, M.V. Rykus, V.I. Snachov. M.: Nauka, 1992. 197 p. (in Russian).

Vulkanogennaya metallogeniya Yuzhnogo Urala [Volcanogenic metallogeny of the Southern Urals] / I.B. Seravkin, S.E. Znamenskiy, A.M. Kosarev, M.V. Rykus, D.N. Salikhov, V.I. Snachov, V.M. Moseychuk. M.: Nauka, 1994. 160 p. (in Russian).

Сведения об авторах:

Косарев Александр Михайлович, канд. геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН). E-mail: amkosarev@mail.ru

Серавкин Игорь Борисович, д-р геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН). E-mail: seravkin@ufaras.ru

About the authors:

Kosarev Aleksandr Mikhailovich, Candidate of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: amkosarev@mail.ru

Seravkin Igor Borisovich, Doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: seravkin@ufaras.ru