

Новые данные по геологической структуре и зональности Воронцовского золоторудного поля на Северном Урале

Викентьев И. В.¹, Викентьева О. В.¹, Блоков В. И.^{1,2}, Выхристенко Р. И.¹,
Юшко Н. А.², Криночкин Л. А.²

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва, Россия

² Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ), г. Москва, Россия

Аннотация. Размещение месторождений золота, меди и железа на Северном Урале, включающем крупнейший Турьинско-Ауэрбаховский рудный район, контролируется линейными зонами северо-западного простирания вероятной разломной природы. Установлено влияние региональных факторов (тектонический, магматический, геохимический), благоприятствующих образованию крупного Au-As-Sb-Hg-Tl Воронцовского месторождения, локализованного в вулканогенно-осадочном, существенно карбонатном разрезе. На месторождении выявлены сближенные пучки девонских дорудных и каменноугольных пострудных базитовых даек. Первичные поликомпонентные геохимические ореолы вместе с рудами образуют мощную рудно-ореольную зону, приуроченную к пологому тектоническому контакту песчано-алевролитовой и известняковой пачек. Основные ореолообразующие элементы в разрезе распределены зонально. В лежачем боку золоторудной залежи преобладают Zn, Cd, Cu, Pb, Ag, Bi, в осевой зоне – Sb, Hg, Tl, As, в висячем боку – As, Zn, Hg, Pb, Ag, (Cu). На востоке (ближе к Ауэрбаховскому массиву гранитоидов) накапливаются Ag, Zn, Pb, Mn, Y, Mo, W, на западе, наиболее удаленно от интрузива, – Sb, Ba, As, Hg, Co, Ni, Sn. ⁴⁰Ar/³⁹Ar возраст для гидрослюды золотомышьяковых руд ~ 391,1 млн лет отвечает периоду внедрения гранодиоритов завершающей фазы Ауэрбаховского массива. Сделан вывод об определяющем магматическом вкладе в образование руд.

Ключевые слова: Урал, золоторудное месторождение, первичные геохимические ореолы, тип Карлин, природа гидротермальных растворов, магматический флюид.

Для цитирования: Викентьев И. В., Викентьева О. В., Блоков В. И., Выхристенко Р. И., Юшко Н. А., Криночкин Л. А. Новые данные по геологической структуре и зональности Воронцовского золоторудного поля на Северном Урале. Руды и металлы. 2023. № 4. С. 23–35. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10017.

New data on the geological structure and zonality of the Vorontsovka gold field in the Northern Urals

Vikentyev I. V.¹, Vikentjeva O. V.¹, Blokov I. V.^{1,2}, Vykhristenko R. I.¹, Yushko N. A.², Krinochkin L. A.²

¹ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, Russia

² Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements (IMGRE), Moscow, Russia

Annotation. Spatial distribution of gold, copper, and iron ore deposits in the Northern Urals with the largest Turya-Auerbakh ore region is controlled by north-west trending linear zones of a probably fault nature. The influence has been demonstrated of regional factors (including the tectonic, magmatic, and geochemical ones) favoring formation of the large Au-As-Sb-Hg-Tl Vorontsovka deposit located within a volcanogenic-sedimentary, substantially carbonate rock sequence. Closely spaced swarms of Devonian pre-ore and Carboniferous post-ore mafic dykes have been identified within the deposit. The primary geochemical halos of the Vorontsovka deposit have a multielement composition and, coupled with the ores, form a thick ore-halo zone confined to the gentle tectonic contact of sandstone-siltstone and limestone units. The main halo-forming elements are zonally distributed in the section. The footwall side of the gold deposit (rear zone) is dominated by Zn, Cd, Cu, Pb, Ag, and Bi; the axial zone, by Sb, Hg, Tl, and As; and the hanging side (frontal zone), by As, Zn, Hg, Pb, Ag, (Cu). In the east (closer to the Auerbakh granitoid massif), Ag, Zn, Pb, Mn, Y, Mo, and W relatively accumulate, while in the west (most remotely from the intrusive), Sb, Ba, As, Hg, Co, Ni, and Sn dominate. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of ~391.1 million years, obtained for hydromica of the gold-arsenic ores, corresponds to the period of emplacement of granodiorite of the final Auerbakh massif intrusive phase. The conclusion is made on the crucial magmatic contribution to the formation of gold ores of the deposit.

Keywords: Urals, gold deposit, primary geochemical halos, Carlin type, nature of hydrothermal solutions, magmatic fluid.

For citation: Vikentyev I. V., Vikentjeva O. V., Blokov V. I., Vykhristenko R. I., Yushko N. A., Krinochkin L. A. New data on the geological structure and zonality of the Vorontsovka gold field in the Northern Urals. Ores and metals, 2023, № 4, pp. 23–35. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10017.



Введение. Воронцовское золоторудное месторождение, крупнейшее на Северном Урале, находится недалеко от южной окраины г. Красноуральска Свердловской области, в южной части Турьинско-Ауэрбаховского рудного района [2, 6]. В районе развиты разнообразные рудные месторождения [3, 11], пик добычи руды и металлов на которых прошёл [2]. Освоение района началось 265 лет назад с отработки Турьинских рудников – руды добывались всё это время непрерывно и почти полностью выработаны; последняя медная шахта была затоплена в 2015 г. Построенный здесь 20 лет назад крупный горно-металлургический комбинат «Золото Северного Урала», выпускавший в слитках до 5 т золота в год, ныне снижает мощности в связи с недозагрузкой сырьём. Серьёзного задела минерально-сырьевой базы по золоту в районе нет. Остаётся открытым вопрос о фак-

торах рудоконтроля, включая региональные, которые благоприятствовали образованию необычного для провинции компактного развития широкого спектра месторождений: медно- и железо-скарновых залежей, золотых россыпей, а также нетрадиционного для Урала золотого оруденения типа Карлин. Слабо освещены в литературе вопросы геохимической зональности. Материалы статьи отчасти ликвидируют эти пробелы.

Геологическая позиция рудных полей. Турьинско-Ауэрбаховский рудный район (в ранних работах называемый Турьинским) находится в приосевой части Тагильской мегазоны [3, 6]. К западу от неё, за Главным Уральским разломом, находится Центрально-Уральская мегазона, а к востоку, за Серовско-Маукской зоной тектонического меланжа – Восточно-Уральская, почти полностью перекрытая осадочным

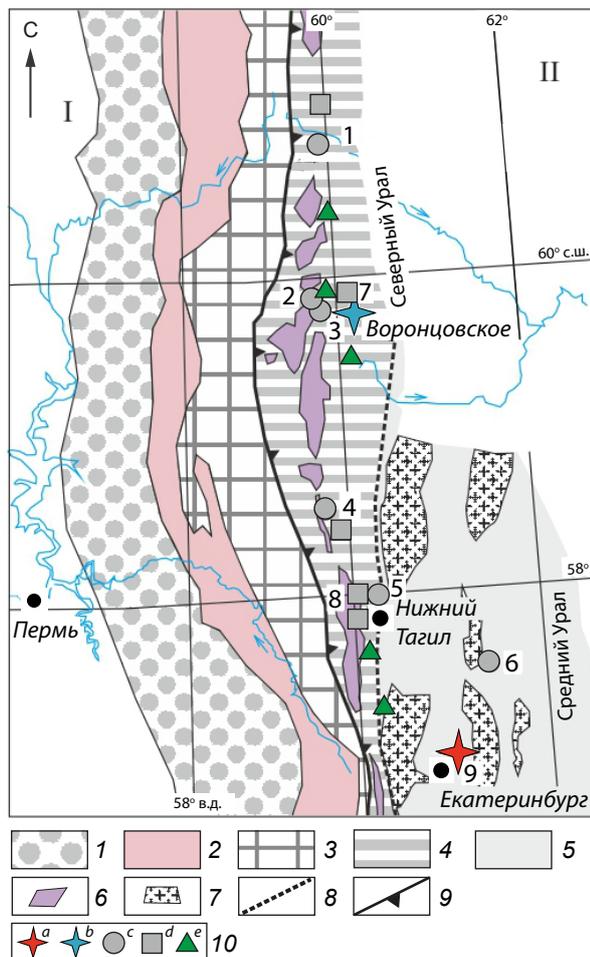


Рис. 1. Схема тектонического строения Среднего и Северного Урала (упрощено по [10]) и позиция основных типов эндогенного оруденения:

1 – Предуральский прогиб; 2 – Западно-Уральская зона; 3 – Центрально-Уральская зона; 4 – Тагильская зона; 5 – Восточно-Уральская зона; 6 – массивы Платиноносного пояса; 7 – массивы Главного Гранитного пояса; 8 – Серовско-Маукская зона меланжа; 9 – Главный Уральский разлом; 10 – типы месторождений: *a* – золоторудные, связанные с гранитами, *b* – золоторудные карлинского типа, *c* – колчеданные, *d* – Cu/Fe скарновые, *e* – медно-порфировые; месторождения: 1 – Ново-Шемурское, 2 – Валенторское, 3 – Галкинское, 4 – Кабанское, 5 – Сан-Дonato, 6 – Сафьяновское, 7 – Ауэрбахская группа (Cu, Fe), 8 – Естинихинское (Fe), 9 – Берёзовское (Au)

Fig. 1. Schematic tectonic map of the Middle and Northern Urals (simplified after [10]) and position of the main types of the endogenous mineralization:

1 – Ural Foredeep; 2 – Western Ural Zone; 3 – Central Ural Zone; 4 – Tagil Zone; 5 – Eastern Ural Zone; 6 – massifs of the Platinum Belt; 7 – massifs of the Main Granite Belt; 8 – Serov-Mauk Zone of melange; 9 – Main Ural Fault; 10 – types of ore deposits: *a* – granite-related gold, *b* – Carlin type gold, *c* – VMS, *d* – Cu-Fe skarn, *e* – porphyry copper; ore deposits: 1 – Novo-Shemurskoe, 2 – Valentorskoe, 3 – Galkinskoe, 4 – Kaban'skoe, 5 – San Donato, 6 – Safyanovskoe, 7 – Auerbach group (Cu, Fe), 8 – Estinikhinskoe (Fe), 9 – Berezovskoe (Au)



чехлом (рис. 1). Район охватывает восточную часть Тагильской мегазоны и принадлежит к крупному Турьинско-Ауэрбаховскому магматическому ареалу. Этот ареал проявлен в виде вулканических полей (O_3-D_2ef) и множества интрузивных и субвулканических тел (от S_2 до C_1); большинство их отвечает фемическим магматическим сериям островодужной природы [10]. В целом эволюция Тагильской островной дуги характеризовалась сменой известково-щелочных вулканитов (O_3-S_1), включая колчеданосные, субщелочными сериями (S_2-D_2). Вокруг его центра, занятого Ауэрбаховским габбро-диорит-гранодиоритовым плутоном, размещены многие рудные месторождения, все они золотосодержащие: скарново-магнетитовые (месторождения Ауэрбаховской группы) и медноскарновые (Фроловское, Вадимо-Александровское и другие Турьинской группы), золоторудные (с As, Sb, Hg и Tl – Воронцовское; мелкие месторождения – Пещерное, Горнячка). Также есть жильные золото-кварцевые и медно-порфиновые проявления, многочисленные россыпи золота и платины [3, 11].

Новые возможности, связанные с организацией Министерством природных ресурсов РФ открытого цифрового банка данных информации по рудной нагрузке территорий [4], позволили заново подойти к вопросу о поисках региональных металлогенических особенностей эндогенной рудной минерализации. Оказалось, что упомянутые рудные (Fe, Cu, Zn, Co, Ni, Au, Pt и др.) месторождения в регионе контролируются линейными зонами (трендами) северо-западного простирания (рис. 2), очевидно, разломной природы. В эти же зоны помимо эндогенных месторождений попадают и многочисленные россыпи золота и платины. Во второй половине XX века [9, 13], а также в отдельных недавних работах [1, 5, 12, 20] линейные тектонические зоны северо-западной ориентировки упоминались и изображались на различных мелкомасштабных геологических, геофизических и других картах и схемах Урала. Положение и ориентировка для них определены нечётко (чаще по геофизическим данным, реже по геоморфологическим), число

варьирует от работы к работе, а природа, вероятно, связана с глубинными разломами. Возраст таких «шовных зон» – допалеозойский, но они неоднократно (в кембрии, раннем силуре, среднем девоне) подновлялись [12].

Турьинско-Ауэрбаховскому рудному району отвечает одноимённая вулканотектоническая депрессия – грабен-синклиналь с пологим падением крыльев к центру структуры (рис. 3). Она выполнена вулканогенными, вулканогенно-осадочными и осадочными породами краснотурьинской свиты (мощность до 5 км), датированной ранним девонем. Образования данной свиты рудовмещающие для многочисленных скарновых (Cu, Fe, Cu + Fe) залежей, а также золоторудных месторождений, включая Воронцовское [2, 11].

Геологическое строение месторождения. Воронцовское золоторудное месторождение было открыто 38 лет назад поисковыми работами на рудное золото на Песчанско-Воронцовском кварцево-жильном рудном поле в 1985–1986 гг. [2]. В рудном поле наиболее продуктивной частью девонского разреза является нарушенная надвигом зона контакта ритмично-слоистой вулканогенно-осадочной толщи и подстилающих брекчиевидных известняков [3, 11, 22]. Здесь в метасоматически изменённых зонах дробления и смятия по упомянутым породам образовались основные золоторудные тела Воронцовского месторождения, имеющие сложную морфологию [3, 11, 14]. Они приурочены к внешней части железо-скарнового ореола, возникшего под влиянием Ауэрбаховского габбро-диорит-гранодиоритового массива [6, 8, 14], входящего в раннедевонскую вулканоплутоническую ассоциацию.

Известняки и туффиты эмса пересечены на Воронцовском месторождении роями мафитовых даек (рис. 4), по мнению В. Н. Сазонова [11], дорудными по отношению к золотомышьяковому оруденению. Дорудные дайки сильно изменены в рудной зоне [7]. Наряду с ними есть более молодые тела базитов (в основном лампрофиров), сложенные свежими малоизменёнными породами. По последним данным [21], сближенные пучки жильных тел представлены двумя комплексами, образующими серии

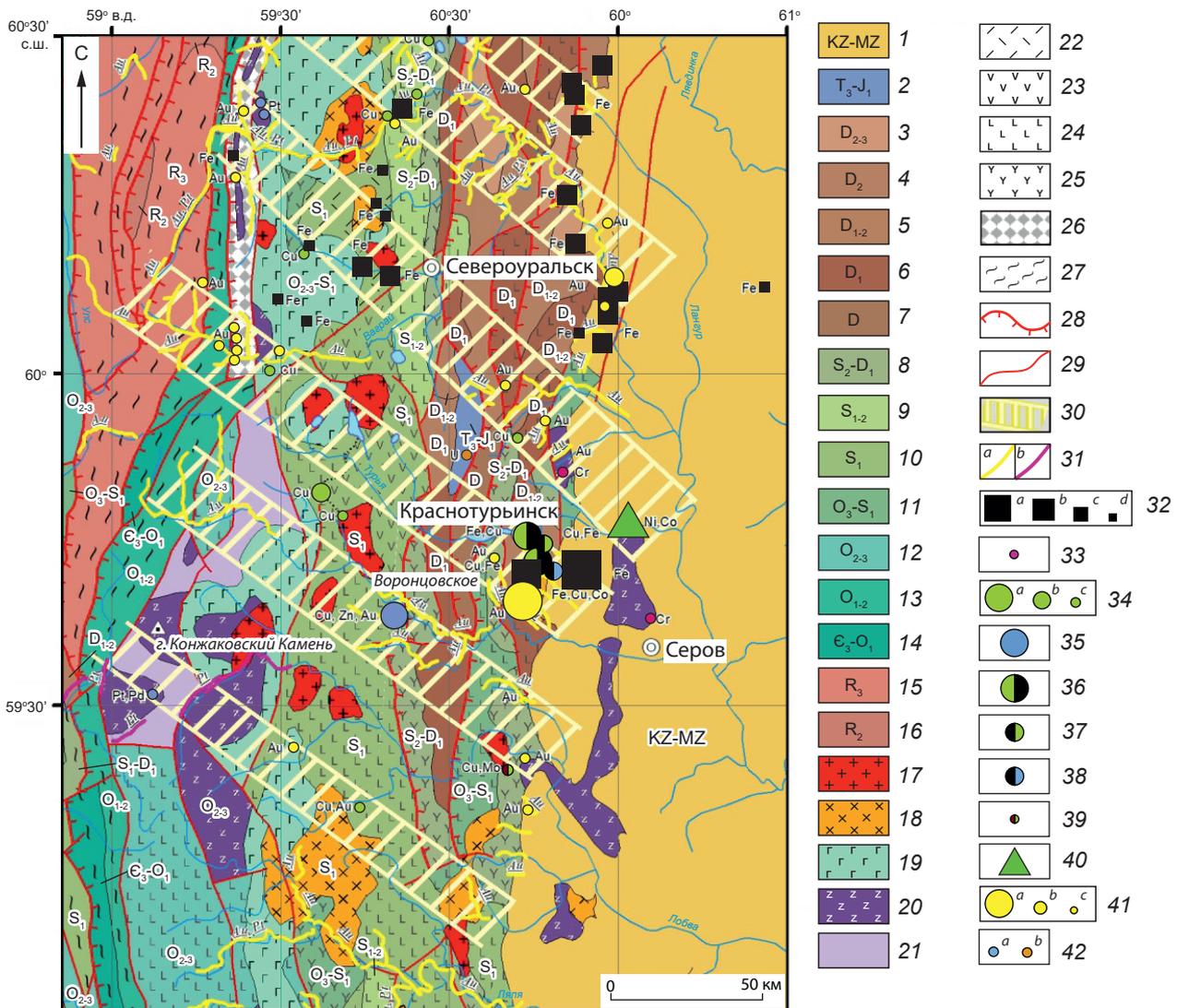


Рис. 2. Контроль размещения золотого и сопутствующего оруденения Северного Урала тектоническими зонами северо-западного простирания. Геологическая основа, позиция месторождений и проявлений по [4] с небольшими изменениями:

стратиграфические подразделения: 1 – мезозойско-кайнозойский чехол; 2 – триасово-юрские отложения T_3-J_1 (аргиллиты, алевролиты, песчаники); девонская система: 3 – средний–верхний отделы (известняки, алевролиты), 4 – средний отдел (известняки), 5 – нижний–средний отделы (известняки, сланцы глинистые), 6 – нижний отдел (базальты, трахибазальты, андезибазальты), 7 – нерасчленённые отложения (известняки, алевролиты, песчаники); 8 – силурийско-девонские отложения S_2-D_1 (туфопесчаники, туфо-алевролиты, туфоконгломераты); силурийская система: 9 – нижний–верхний отделы (базальты, андезибазальты, их туфы), 10 – нижний отдел (базальты, андезибазальты, их туфы); 11 – ордовикско-силурийские отложения O_3-S_1 (базальты, долериты, дациты, риолиты, туфы); ордовикская система: 12 – средний–верхний отделы (металавы и метатуфы базальтов, долеритов), 13 – нижний–средний отделы (сланцы, песчаники кварцитовидные, туфосланцы); 14 – кембрийско-ордовикские отложения C_3-O_1 (сланцы филлитовидные, кварцитопесчаники, кварциты); рифей: 15 – верхний (сланцы хлорит-серицит-кварцевые), 16 – средний (сланцы серицит-хлорит-кварцевые, мраморы); интрузии: 17 – кислые, 18 – средние, 19 – основные, 20 – ультраосновные; 21 – белогорский гнейсо-амфиболитовый метаморфический комплекс; вулканы, преимущественно лавы: 22 – кислого состава (риолиты, дациты, риодациты), 23 – среднего состава (андезиты, андезибазальты), 24 – основного состава (базальты), 25 – не расчленённые по составу;



26 – тектонический меланж; 27 – породы зеленосланцевой фации метаморфизма; 28 – надвиги; 29 – прочие разрывные нарушения; 30 – линейные рудоносные зоны (тренды); 31 – россыпи: *a* – Au (с Pt), *b* – Pt (с Au); 32 – месторождения Fe: *a* – крупные, *b* – средние, *c* – мелкие, *d* – проявления; 33 – проявления Cr; 34 – месторождения Cu: *a* – средние, *b* – мелкие, *c* – проявления; 35 – среднее месторождение Zn (Галкинское); 36 – средние месторождения Cu и Fe; 37 – мелкие месторождения Fe и Cu; 38 – мелкие месторождения Fe, Cu и Co; 39 – проявление Cu и Mo; 40 – крупные месторождения Ni и Co; 41 – месторождения Au: *a* – крупные, *b* – малые, *c* – проявления; 42 – проявления: *a* – Pt, *b* – U

Fig. 2. Control of distribution of the gold and associated mineralization in the Northern Urals by north-west trending tectonic zones. Geological basis and position of the ore deposits and occurrences correspond to [4] with minor changes:

stratigraphic units: 1 – Mesozoic–Cenozoic cover; 2 – Triassic–Jurassic (T_3 – J_1) (mudstones, siltstones, sandstones); Devonian: 3 – Middle–Upper Devonian (limestones, siltstones), 4 – Middle Devonian (limestones), 5 – Lower–Middle Devonian (limestones, shales), 6 – Lower Devonian (basalts, trachybasalts, basaltic andesites), 7 – undifferentiated sediments (limestones, siltstones, sandstones); 8 – Silurian–Devonian (S_2 – D_1) (tuffaceous sandstones, siltstones, and conglomerates); Silurian: 9 – Lower–Upper Silurian (basalts, basaltic andesites, their tuffs), 10 – Lower Silurian (basalts, basaltic andesites, their tuffs); 11 – Ordovician–Silurian (O_3 – S_1) (basalts, dolerites, dacites, rhyolites, tuffs); Ordovician: 12 – Middle–Upper Ordovician (metalavas and metatuffs of basalts, dolerites), 13 – Lower–Middle Ordovician (shales, quartzite-like sandstones, tuffaceous schists); 14 – Cambrian–Ordovician (C_3 – O_1) (phyllitic shales, quartzite sandstones, quartzites); Riphean: 15 – Upper Riphean (chlorite-sericite-quartz schists), 16 – Middle Riphean (sericite-chlorite-quartz schists, marbles); intrusions: 17 – silicic, 18 – intermediate, 19 – basic, 20 – ultrabasic; 21 – Belogorsk gneiss-amphibolite metamorphic complex; volcanics, mainly lavas: 22 – felsic (rhyolites, dacites, rhyodacites), 23 – intermediate (andesites, basaltic andesites), 24 – mafic (basalts), 25 – not classified by composition; 26 – tectonic melange; 27 – rocks of the greenschist metamorphic facies; 28 – thrusts; 29 – other faults; 30 – linear ore-bearing zones (trends); 31 – placers: *a* – Au (with Pt), *b* – Pt (with Au); 32 – Fe deposits: *a* – large, *b* – medium, *c* – small, *d* – occurrences; 33 – Cr occurrences; 34 – Cu deposits: *a* – medium, *b* – small, *c* – occurrences; 35 – medium Zn deposit (Galkinskoe); 36 – medium Cu and Fe deposits; 37 – small Fe and Cu deposits; 38 – small Fe, Cu, and Co deposits; 39 – Cu and Mo occurrence; 40 – large Ni and Co deposits; 41 – Au deposits: *a* – large, *b* – small, *c* – occurrences; 42 – other occurrences: *a* – Pt, *b* – U

даек: девонскую дорудную и каменноугольную пострудную. Состав последних характеризуется повышенной щёлочностью. Датирование $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом биотита из дайки послерудных лампрофиров (керсантита) показало их раннекаменноугольный возраст ~ 346 млн лет [21], что согласуется с новыми данными по довольно широкому развитию каменноугольного магматизма рифтогенной природы в пределах как Тагильской (Средний – Полярный Урал), так и Магнитогорской мегазон [10, 21].

Изотопные составы свинца руд и магматических пород образуют на Pb–Pb диаграммах единый тренд [7], что отражает отдалённую генетическую связь оруденения с глубинными магмами. Согласно геохимическим данным [7, 21], точки составов пород даек попадают в поля островодужных, рифтогенных или внутриплитных образований. Подобное смешанное сочетание геохимических характеристик могут иметь рифтогенные породы, образовавшиеся при плавлении деплетированных

в надсубдукционной обстановке ультрабазитов мантийного клина. Результаты измерений ориентировок и геохимические характеристики даек позволяют полагать, что они формировались в обстановке взаимодействия поднимающегося астеносферного вещества со структурно-вещественными комплексами активной континентальной окраины, инициировавшего рассеянный рифтинг и внутриплитный базитовый магматизм повышенной щёлочности. По аналогии со штатом Невада с его крупнейшими золоторудными и родственными Cu, Fe, Pb–Zn, Ba и некоторыми другими месторождениями [15–17], где размещение рудных полей в пределах известных трендов Карлин, Юрек, Гетчел и Джеррит Каньон контролируется упорядоченными рядами даек [19], мы ожидаем основные открытия месторождений золота и родственных ему типов оруденения в разломных зонах (трендах) северо-западной ориентировки.

Геохимические ореолы месторождения. Определение валовых содержаний химических

Рис. 3. Схематическая геологическая карта Турьинско-Аурбаховского рудного района. Исползованы фондовые материалы Н. С. Лисова (1978 г.) и В. Н. Боброва (1991 г.):
1 – базальты красноуральской свиты (O_3-S_1kr); 2 – вулканогенные образования трахибазальт-трахиандезитовой формации: *a* – лавы, *b* – туфопесчаники, туфоалевролиты (туринская свита S_2-D_1tr); красноуральская свита D_1kt ; 3 – порфириты базальтовые, их туфы, вулканомиктовые гравелиты, 4 – андезиты, их туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты, 5 – известняки; субвулканические образования: 6 – диоритовые порфириты, 7 – андезибазальтовые и базальтовые порфириты; интрузивные образования: 8 – ультрамафиты серовского комплекса (O_2sr); интрузивные образования габбро-диорит-гранодиоритовой формации, аурбаховский комплекс (D_1a); 9 – граниты, аляскитовые граниты, 10 – гранодиориты, 11 – диориты, кварцевые диориты, 12 – габбро, габродиориты, 13 – внешасштабные дайки диоритов, лампрофиров и габбро; 14 – разломы, ограничивающие вулканотектоническую структуру; 15 – разрывные нарушения; *a* – достоверные, *b* – предполагаемые; 16 – участки скарнирования; 17 – конгур Воронцовского золоторудного месторождения; 18 – месторождения (*a*) и рудопроявления (*b*) золото-сульфидно-кварцевой формации; 19 – магнетит-скарновые месторождения (*a*), то же, с наложенной пирротиновой и пирит-халькопиритовой минерализацией (*b*); 20 – медно-скарновые месторождения с пирит-халькопиритовыми рудами (*a*), то же, с эпидозитами (*b*); цифры в кружках – рудоконтролирующие разломы района Воронцовского месторождения; 1 – Воронцовский, 2 – Южно-Воронцовский, 3 – Северо-Воронцовский; месторождения и проявления: 1 – Аурбаховская группа месторождений, 2 – Ново-Песчанское, 3 – Северо-Южно-Песчанское, 4 – Западно-Песчанское, 5 – Полуденское, 6 – Северо-Воронцовское и Воронцовское, 7 – Южно-Воронцовское, 8 – Гаревское, 9 – Владыкинское, 10 – Каквинское, 11 – 34-й Квартал, 12 – Троицко-Михайловское, 13 – Богословское и Башмаковское, 14 – Вадимо-Александровское, 15 – Никитинское, 16 – Успенское, 17 – Фроловское, 18 – Суворовское, 19 – Васильевское, 20 – Суходойское, 21 – Псарёвское, 22 – Пещерное, 23 – Горнячка

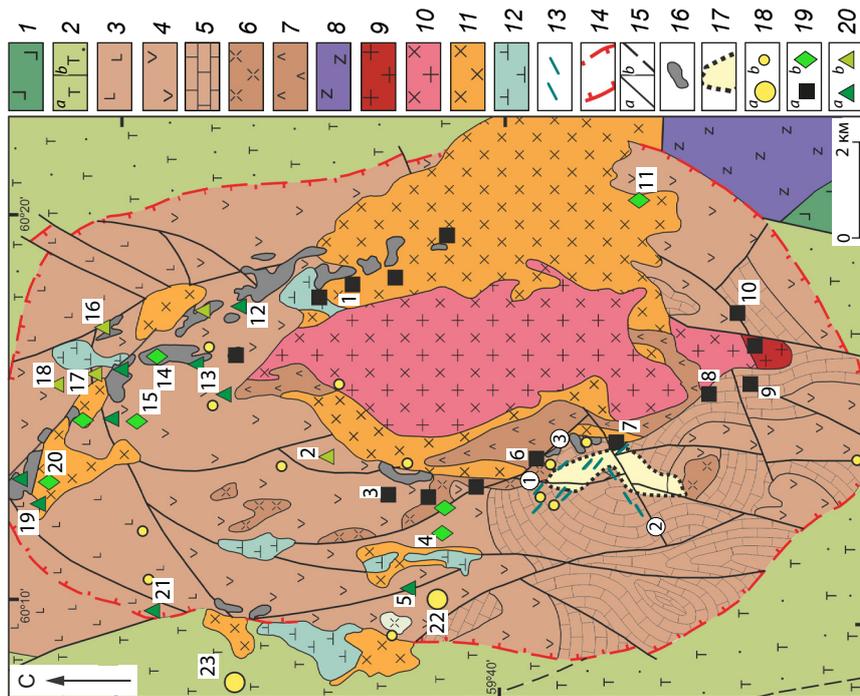


Fig. 3. Schematic geological map of the Turya-Auerbakh ore region. Compiled using unpublished reports by N. S. Lisov (1978) and V. N. Bobrov (1991):

1 – Krasnouralsk formation (O_3-S_1kr), basalts; 2 – Turya formation (S_2-D_1tr), trachybasalt-trachyandesite association: *a* – lavas, *b* – tuffaceous sandstones and siltstones; Krasnoturyinsk formation (D_1kt): 3 – porphyritic basalts and their tufts, volcanomictic gravelstones, 4 – andesites and their tufts, and tuffaceous sandstones and siltstones, 5 – limestones; 6 – diorite porphyrites, 7 – basaltic andesites and basalt porphyrites; intrusive formations of the Serov suite (O_2sr): 8 – ultramafites of the Auerbakh suite of the gabbro-diorite-granodiorite association (D_1a): 9 – granites, alaskitic granite, 10 – granodiorite, 11 – diorite, quartz diorite, 12 – gabbro, gabbrodiorite, 13 – off-scale dykes of diorite, lamprophyre, and gabbro; 14 – faults framing the volcanotectonic feature; 15 – faults: *a* – reliable, *b* – assumed; 16 – skarnification sites; 17 – Vorontsovka gold deposit outlines; 18 – gold-sulfide-quartz type mineralization: *a* – ore deposits, *b* – ore occurrences; 19 – magnetite skarns: *a* – magnetite deposits, *b* – magnetite deposits with superimposed pyrrhotite and pyrite-chalcopyrite mineralization; 20 – copper skarns: *a* – ore deposits with pyrite-chalcopyrite ores, *b* – the same with epidotes; circled figures are for the ore-controlling faults of the Vorontsovka deposit area: 1 – Vorontsovka, 2 – South-Vorontsovka, 3 – North-Vorontsovka, 3 – North-Vorontsovka, 6 – Vorontsovka Fe and North-Vorontsovka, 7 – South Vorontsovka, 8 – Garevskoe, 9 – Vladyskinoe, 10 – Kakva, 11 – 34th Quarter, 12 – Troitsk-Mikhaylovsk, 13 – Bogoslovsk and Bashmakovsk, 14 – Vadimo-Aleksandrovskoe, 15 – Nikitinskoe, 16 – Uspenskoe, 17 – Prolovskoe, 18 – Vasil'yevskoe, 19 – Vasil'yevskoe, 20 – Sukhodoyevskoe, 21 – Psarevskoe, 22 – Peshchernoe, 23 – Gornjachka

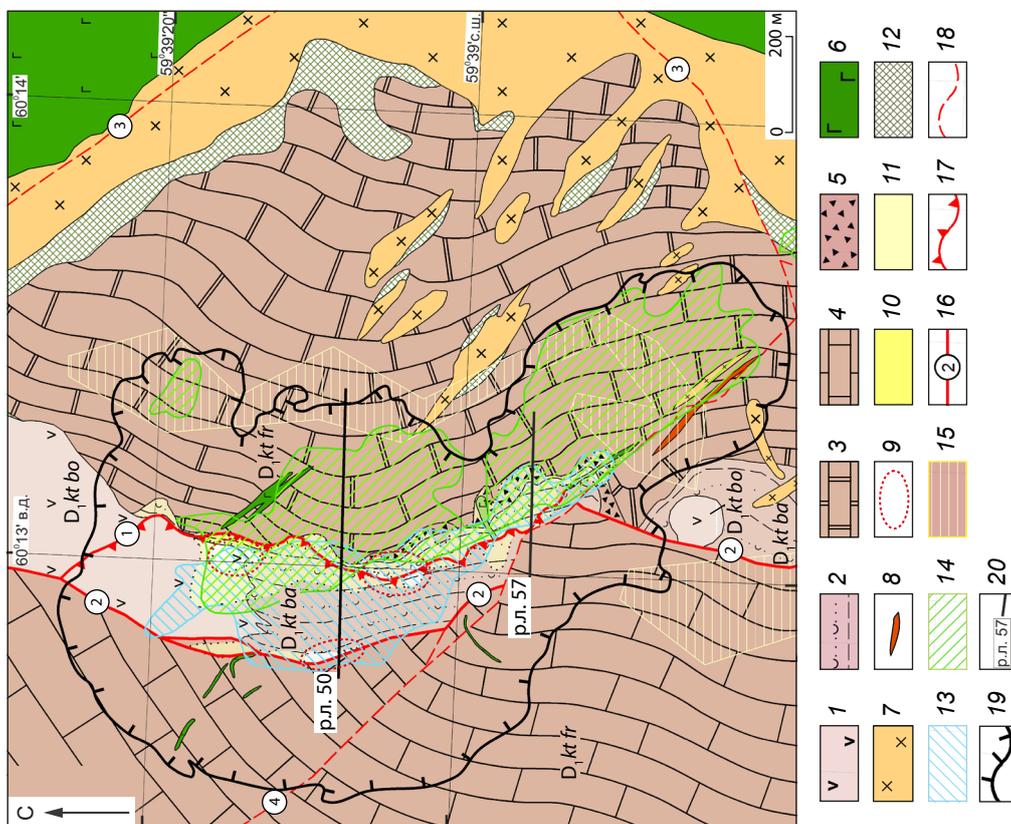


Рис. 4. Схематическая геологическая карта Воронцовского месторождения, по данным Воронцовской геологоразведочной партии, упрощено на основе [3]:

красногурьинская свита: 1 – богословская толща $D_1kt\ bo$ (степановский горизонт): андезиты, их туфы и лавобрекчий, экструзии андезитов, 2 – башмаковская толща $D_1kt\ ba$: вулканогенно-осадочные породы (туфоконгломераты, туфопесчаники, туфоалевролиты с прослоями кремнистых пород и известняков); фроловско-васильевская толща $D_1kt\ fr$: 3 – мраморы, 4 – известняки, 5 – карбонатно-осадочная брекчия; 6 – субвулканические пироксен-плагиоклазовые порфиры основного состава; 7 – диориты; 8 – дайки лампрофиров (одиониты, керсантиты); 9 – аргиллизиты (кварц-серицит-монтмориллонит-каолиновые метасоматиты); 10 – зоны аргиллизации с серицитом, монтмориллонитом, гидрослюдай, смектитом, гидрохлоритом; 11 – каолинит-кварц-серицитовые, кварц-серицитовые метасоматиты; 12 – скарны; 13 – проекции первичных руд на поверхность; 14 – проекции окисленных руд на поверхность; 15 – россыпи; 16 – разрывные нарушения; 17 – главные разломы (1 – Воронцовский рудоконтролирующий надвиг, 2 – Воронцовский взброс, 3 – Южно-Воронцовский, 4 – Южно-Песчанский); 17 – надвиг; 18 – второстепенные разломы; 19 – контур Северного карьера; 20 – разведочные линии

Fig. 4 Schematic geological map of the Vorontsovka deposit, based on data of the Vorontsovka exploration party (simplified after [3]):

Krasnoturyinsk formation: 1 – Bogoslovsk sequence, $D_1kt\ bo$ (Stepanovsk horizon): andesites, their tufts and lava breccias, andesidacite extrusions; 2 – Bashmakovsk sequence, $D_1kt\ ba$: volcanosedimentary rocks (tuffaceous conglomerates, sandstones, and siltstones) with interlayers of cherty rocks and limestones; Frolovsk-Vasilevsk sequence, $D_1kt\ fr$: 3 – marbles, 4 – limestones, and 5 – carbonate-sedimentary breccias; 6 – subvolcanic pyroxene-plagioclase porphyrites of basic composition; 7 – diorites; 8 – lamprophyre dykes (odinites, kersanitites); 9 – argillic rocks (quartz-sericite-montmorillonite-kaolinite metasomatites); 10 – zones of argillization with sericite, montmorillonite, hydromica, smectite, and hydrochlorite; 11 – kaolinite-quartz-sericite and quartz-sericite metasomatites; 12 – skarns; 13 – projections of the primary ores to the surface; 14 – projections of the oxidized ores to the surface; 15 – placers; 16 – major faults (1 – ore-controlling Vorontsovka thrust, 2 – Vorontsovka reverse fault, 3 – South-Vorontsovka, 4 – South-Peschanka); 17 – thrust; 18 – minor faults; 19 – Northern Open Pit outlines; 20 – exploration lines



элементов в коренных породах, включая минерализованные, опробованные в представительном профиле (сводный по буровым линиям 56б и 57) по керну скважин, проводилось методом полуколичественного спектрально-эмиссионного анализа (ПКСА) в лаборатории Бронницкой геолого-геохимической экспедиции ИМГРЭ. Получены валовые содержания 40 элементов: Li, Be, B, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Yb, Hf, Ta, W, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U.

Первичные геохимические ореолы месторождения поликомпонентного состава вместе с рудами образуют мощную рудно-ореольную зону, приуроченную к контакту вулканоген-

но-осадочной и карбонатной толщ (рис. 5, 6). Она прослеживается в субмеридиональном направлении на 2,7 км при ширине в плане до 600 м. Основные ореолообразующие элементы – Au, Ag, As, Hg, Sb, Pb, Zn, Cd, Cu, Ba, Mn, Tl. Анализ распределения элементов в рудно-ореольной зоне показал следующую вертикальную зональность геохимического поля: в лежащем боку золоторудной залежи (подрудная, тыловая зона) накапливаются Zn, Cd, Cu, Pb, Ag, Bi, в осевой зоне – Sb, Hg, Tl, As, в висячем боку (фронтальная зона) – As, Zn, Hg, Pb, Ag, (Cu).

Для нижних, подрудных частей этой зоны характерно развитие в известняках на контакте с дайками золотосодержащей полиметаллической ассоциации с низкими содержа-

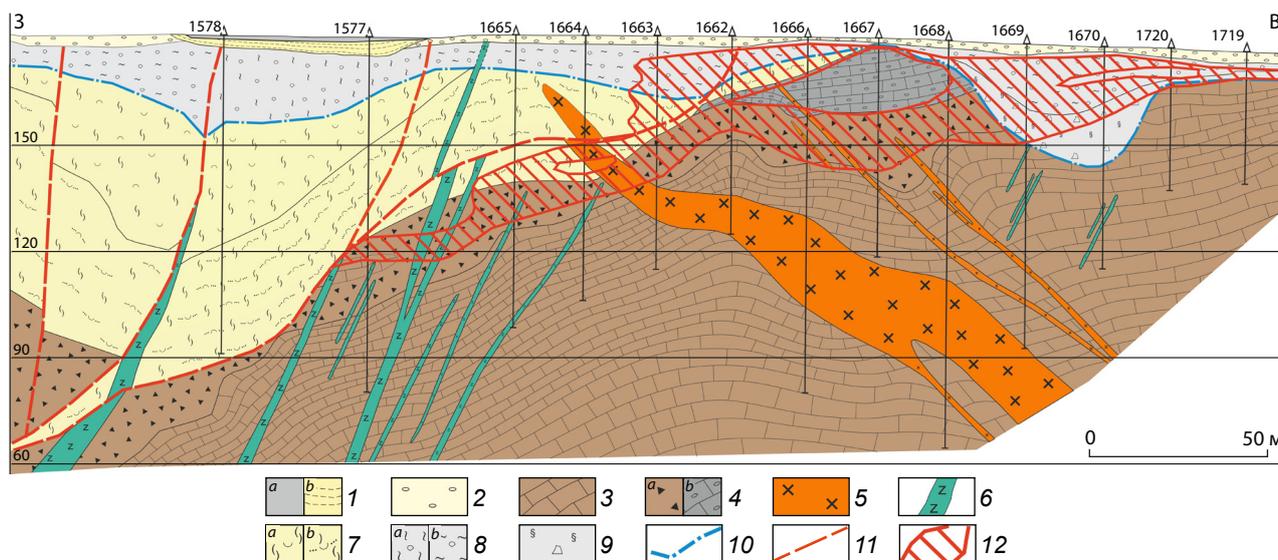


Рис. 5. Геологический разрез Воронцовского золоторудного месторождения (сводный по буровым линиям 56б и 57) по материалам Воронцовской геологоразведочной партии (Бобров В. Н. и др.):

четвертичные отложения: 1 – озёрные отложения: *a* – торф, *b* – глины; 2 – терригенные наносы; краснотурьинская свита: 3 – вулканогенно-осадочная толща (туфопесчаники, туфоалевролиты с прослоями кремнистых алевролитов и известняков); 4 – карбонатная толща: *a* – мраморы, *b* – известняковые брекчии; дайки: 5 – монцодиоритов, 6 – диабазовых порфиритов; 7 – аргиллизиты по туфам (*a*) и туфогенно-осадочным породам (*b*); 8 – кора выветривания: *a* – структурная, *b* – перемещённая; 9 – карст; 10 – граница развития коры выветривания; 11 – разломы (взбросы, надвиг); 12 – контуры золоторудных тел

Fig. 5. Geological section across the Vorontsovka gold deposit (combined of the borehole lines 56b and 57), based on materials of the Vorontsovka exploration party (V. N. Bobrov et al.):

Quaternary sediments: 1 – lacustrine deposits (*a* – peat, *b* – clay), 2 – terrigenous drift; Krasnoturyinsk formation: 3 – volcanosedimentary sequence: tuffaceous sandstones, tuffaceous siltstones with interlayers of cherty siltstones and limestones; 4 – carbonate sequence: *a* – marbles, *b* – limestone breccias; dykes of (5) monzodiorite, and (6) diabase porphyrite; 7 – argillitic rocks: (*a*) after tuffs, and (*b*) after tuffaceous sedimentary rocks; 8 – weathering crust: *a* – structural, and *b* – displaced; 9 – karst; 10 – the weathering crust limit; 11 – faults (reverse fault, thrust); 12 – gold ore body boundaries

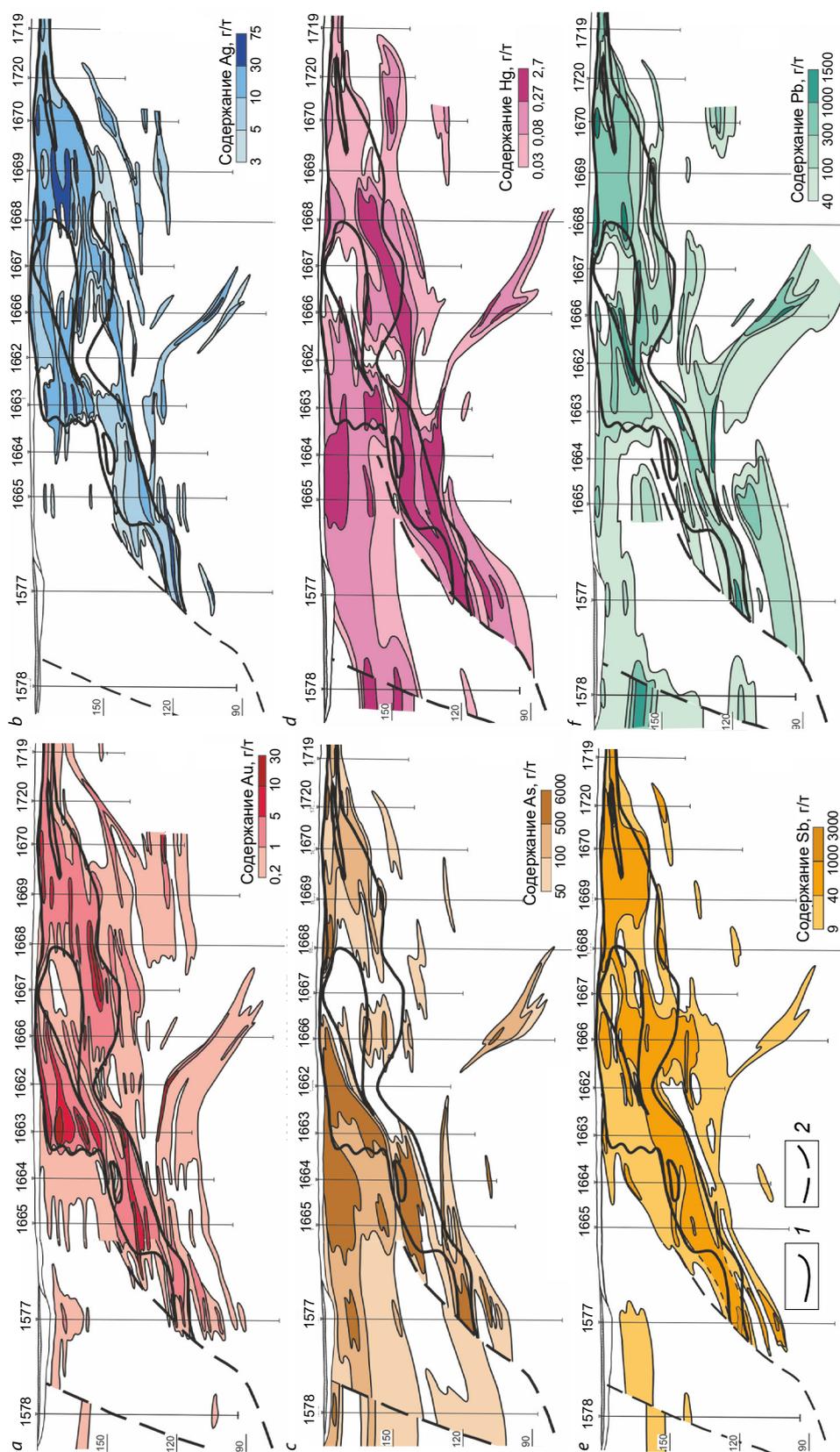


Рис. 6. Первичные ореолы Au (a), Ag (b), As (c), Hg (d), Sb (e), Pb (f) в сводном разрезе Воронцовского месторождения по буровым линиям 566 и 57:

1 – контур рудного тела; 2 – разрывные нарушения

Fig. 6. Primary halos of main elements: (a) Au, (b) Ag, (c) As, (d) Hg, (e) Sb, and (f) Pb in the combined cross section of the Vorontsovka deposit along the drilling lines 566 and 57:

1 – ore body outline; 2 – faults

ниями Sb, Hg и As. Сравнение разных частей рудно-ореольной зоны показывает, что в восточной области (ближе к Ауэрбаховскому массиву гранитоидов) наибольшее относительное накопление имеют Ag, Zn, Pb, Mn, Y, Mo, W, в центральной – Au, Cd, Bi, Tl, Cu, а в западной – Sb, Ba, As, Hg, Co, Ni, Sn. Накопление в ореолах восточной части зоны наряду с элементами верхнерудного уровня (Ag, Pb) элементов, характерных для нижних уровней сульфидного оруденения (Mo, W), позволяет заключить, что здесь эта зона сильно эродирована и на ранние, более высокотемпературные, ассоциации были наложены более поздние, низкотемпературные (с Ag, Pb).

Золоторудная минерализация и её происхождение. Для Воронцовского месторождения типичны тонкорассеянная золотосульфидная минерализация и микронный-субмикронный размер частиц самородного золота в As-пирите [3, 18, 23]. Мы предполагаем для умеренно-солёного (5–9,5 мас. % экв. NaCl), водно-углекислого Ca-, Na- и Mg-хлоридного рудоносного флюида, сформировавшего основную массу Au руд в карбонатных брекчиях [18, 22], магматогенную природу. Au-As-Sb-Hg-Tl оруденение во многом близко к эпитермальному (220–110 °C), глубина его формирования оценивается в 1,5–2 км [22].

Нами обоснован вывод об определяющем, вероятнее всего, преобладающем магматическом вкладе в образование золотоносных скарновых месторождений Турьинского рудного поля и Воронцовского золоторудного месторождения [3, 22]. Полученный для гидрослюд золотомышьяковых руд по $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст $391,1 \pm 4,9$ млн лет [3, 18] укладывается во временной диапазон становления магматических пород Ауэрбаховского массива и соответствует периоду внедрения гранодиоритов, завершающих интрузивный магматизм. Для Воронцовского месторождения предлагается трёхэтапная модель формирования руд. На первом этапе ($D_{1e_{1-2}}$) происходило вулканогенно-осадочное накопление сульфидов, Fe-оксидов и гидроксидов в виде рассеянной рудной минерализации в верхних частях вулканогенно-осадочных ритмов. На втором этапе (D_{1e_3})

внедрение плутонов и даек габбро-диорит-гранодиоритового комплекса вызывало скарнирование с образованием линз магнетитовых руд на контакте силикатных и карбонатных пород (при температуре, достигавшей 510 °C [18, 22]). Магматогенный флюид, обогащённый Fe, Zn, Pb, Au, Ag и S, перемещался далее к поверхности и попадал в зону пологого экранирующего контакта известняков с тонкослоистыми вулкано-терригенными породами, выполнявшего роль геохимического и петрофизического барьера, с отложением выше и, особенно, ниже него золотосульфидной и сульфосольно-полиметаллической ассоциации. На третьем этапе (D_{2ef_1}) произошёл дополнительный подток магматогенного флюида, обогащённого Hg, As и Sb. При разгрузке этого флюида, смешивавшегося с катагенными водами, были образованы золото-реальгар-антимонитовая минерализация карлинского типа в карбонатных породах и пирит-арсенопиритовая минерализация в вулканогенных флишоидах. В пострудный этап внедрились поздние, раннекаменноугольные дайки диабазов и лампрофиров.

Преобладающий в рудах Воронцовского месторождения субмикроскопический характер частиц самородного золота в As-пирите (наряду с развитием в нём изоморфного Au) сближает его с месторождениями типа Карлин [22, 23]. К другим признакам их сходства относятся: локализация в существенно карбонатном разрезе (с подчинённой долей кремнисто-терригенного и вулканогенного материала), нарушенном крутопадающими и пологими зонами разлома; аналогичные синрудные изменения: для известняков – окремнение (джаспероиды), а для терригенных пород – аргиллизация; широкое развитие сопровождающих и вмещающих рудные тела брекчий; наиболее характерные, помимо пирита, спутники самородного золота – реальгар и арсенопирит; золото-ртутно-таллиево-мышьяковый геохимический спектр руд; эпитермальный, малоглубинный характер минерализации; связь с внешними, удалёнными метасоматическими зонами скарново-порфировых рудно-магматических систем.



Заключение. Ранние рудные ассоциации Воронцовского золоторудного месторождения были сформированы при 510–240 °С (включая магнетитовые скарны и наложенную на них арсенопирит-сульфосольно-полиметаллическую ассоциацию), в отличие от поздней «карлинской» золото-(Fe, As, Hg)-сульфидно-кварцевой минерализации, которая была отложена при снижении температуры от ~ 350 до 100 °С [3, 18, 22]. Золотое оруденение во многом близко к эпitherмальному (220–110 °С) и формировалось на небольшой глубине. Магматогенные флюиды, несущие изотопы с глубинными метками, сформировали золотосодержащую сульфид-

ную минерализацию железо- и медноскарновых залежей района, а также, на периферии скарновых зон, при более низких температурах, – малосульфидную золоторудную минерализацию. По аналогии со штатом Невада мы ожидаем основные открытия золоторудных месторождений и родственных ему типов оруденения в линейных зонах (трендах) северо-западной ориентировки.

Мы благодарим руководство и геологическую службу предприятий уральского филиала НПО «Полиметалл» за содействие в проведении полевых работ. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН № 121041500220-0.

Список литературы

1. Баранников А. Г., Угрюмов А. Н. Проблемы эндогенного золотого рудогенеза мезозоя Урала // Литосфера. – 2003. – № 1. – С. 13–26.
2. Бобров В. Н. Воронцовский клад. Поиски и открытия. – Карпинск : Печатный дом «Перспектива», 2013. – 32 с.
3. Викентьев И. В., Тюкова Е. Э., Мурзин В. В., Викентьева О. В., Павлов Л. Г. Воронцовское золоторудное месторождение. Геология, формы золота, генезис. – Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2016. – 206 с.
4. ГИС-Атлас «Недра России». – URL: <https://vsegei.ru/ru/info/atlaspacket/> (дата обращения: 03.11.2023).
5. Иванов К. С., Пучков В. Н. Поперечная (субширотная) зональность Южного Урала: причины и время возникновения // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – Т. 504. – № 2. – С. 134–139.
6. Минина О. В. Ауэрбаховская комплексная рудно-магматическая система на Среднем Урале // Отечественная геология. – 1994. – № 7. – С. 17–23.
7. Мурзин В. В., Викентьев И. В., Азовскова О. Б., Ровнушкин М. Ю., Стрелецкая М. В., Блоков В. И., Викентьева О. В. Изотопный состав свинца даек и руд Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал) // Литосфера. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 386–396.
8. Мурзин В. В., Сазонов В. Н., Ронкин Ю. Л. Модель формирования Воронцовского золоторудного месторождения на Урале (карлинский тип): новые данные и проблемы // Литосфера. – 2010. – № 6. – С. 66–73.
9. Олли А. И. К вопросу о широтной тектонической поясности Урала // Советская геология. – 1966. – № 7. – С. 36–44.
10. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). – Уфа : Дизайн-ПолиграфСервис, 2010. – 280 с.
11. Сазонов В. Н., Мурзин В. В., Григорьев Н. А. Воронцовское золоторудное месторождение – пример минерализации карлинского типа на Урале // Геология рудных месторождений. – 1998. – Т. 40, № 2. – С. 157–170.
12. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Проблема «молодого» эндогенного золота на Урале // Литосфера. – 2005. – № 1. – С. 128–134.
13. Червяковский Г. Ф., Таврин И. Ф., Ярош А. Я., Ананьева Е. М., Дорофеев Б. Ф., Радионов П. Ф. Широтные и субширотные структуры Урала // Советская геология. – 1966. – № 11. – С. 34–43.
14. Черемисин А. А., Злотник-Хоткевич А. Г. Воронцовское золоторудное месторождение // Руды и металлы. – 1997. – № 1. – С. 59–70.
15. Almeida C. M., Olivo G. R., Chouinard A., Weakly Ch., Poirier G. Mineral paragenesis, alteration, and geochemistry of the two types of gold ore and the host rocks from the Carlin-type deposits in the southern part of the Goldstrike Property, Northern Nevada: implications for sources of ore-forming elements,

- ore genesis, and mineral exploration // *Economic Geology*. – 2010. – V. 105, № 5. – P. 971–1004. – DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.105.5.971>.
16. Cline J. S., Hofstra F. F., Muntean J. L., Tosdal R. M., Hickey K. A. Carlin-type gold deposits in Nevada: critical geologic characteristics and viable models // *Economic Geology*. – 2005. – 100th Anniversary Volume. – P. 451–484.
 17. Fleet M. E., Mumin A. H. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis // *American Mineralogist*. – 1997. – V. 82. – P. 182–193.
 18. Murzin V. V., Naumov E. A., Azovskova O. B., Varlamov D. A., Rovnushkin M. Yu., Pirajno F. The Vorontsovskoe Au-Hg-As ore deposit (Northern Urals, Russia): Geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 85. – P. 271–298.
 19. Ressel M. W., Henry C. D. Igneous geology of the Carlin Trend, Nevada: development of the eocene plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits // *Economic Geology*. – 2006. – V. 101, № 2. – P. 347–383.
 20. Sazonov V. N., Herk A. N., Boorder H. Spatial and temporal distribution of gold deposits in the Urals // *Economic Geology*. – 2001. – V. 96. – P. 685–703.
 21. Vikentyev I., Vikent'eva O., Blokov V., Azovskova O., Rovnushkin M., Murzin V. Mafic dykes of the Vorontsovka Carlin-style gold deposit and their role in ore control, Northern Urals, Russia // *Minerals*. – 2023 (in press).
 22. Vikentyev I. V., Tyukova E. E., Vikent'eva O. V., Chugaev A. V., Dubinina E. O., Prokofiev V. Yu., Murzin V. V. Vorontsovka Carlin-style gold deposit in the North Urals: mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model // *Chemical Geology*. – 2019. – V. 508. – P. 144–166.
 23. Vikentyev I., Vikent'eva O., Tyukova E., Nikolsky M., Ivanova J., Sidorova N., Tonkacheev D., Abramova V., Blokov V., Spirina A., Borisova D., Palyanova G. Noble metal speciations in hydrothermal sulphides // *Minerals*. – 2021. – V. 11, Paper 488. – P. 1–69.

References

1. Barannikov A. G., Ugryumov A. N. Problemy endogennogo zolotogo rudogeneza mezozoya Urala [Problems of endogenous gold oreforming of Urals mesozoic], *Litosfera [Lithosphere]*, 2003, No 1, pp. 13–26. (In Russ.).
2. Bobrov V. N. Vorontsovskii klad. Poiski i otkrytiya [Vorontsov treasure. Searches and discoveries], Karpinsk, Perspektiva Printing House Publ., 2013, 32 p.
3. Vikent'ev I. V., Tyukova E. E., Murzin V. V., Vikent'eva O. V., Pavlov L. G. Vorontsovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie. Geologiya, formy zolota, genesis [Vorontsov gold deposit. Geology, forms of gold, genesis], Ekaterinburg, Fort Dialog-Iset' Publ., 2016, 206 p.
4. GIS-Atlas “Nedra Rossii” [GIS Atlas “Russian mineral resources”], available at: <https://vsegei.ru/ru/info/atlaspacket/> (Accessed: 03.11.2023).
5. Ivanov K. S., Puchkov V. N. Poperechnaya (subshirotnaya) zonal'nost' Yuzhnogo Urala: prichiny i vremya vozniknoveniya [Transverse (sublatitudinal) zonality of the Urals: causes and time of occurrence], *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle [Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences]*, 2022, V. 504, No 2, pp. 134–139. (In Russ.).
6. Minina O. V. Auerbakhovskaya kompleksnaya rudno-magmaticheskaya sistema na Srednem Urale [Auerbakhovskaya complex ore-magmatic system in the Middle Urals], *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, 1994, No 7, pp. 17–23. (In Russ.).
7. Murzin V. V., Vikent'ev I. V., Azovskova O. B., Rovnushkin M. Yu., Streletskaya M. V., Blokov V. I., Vikent'eva O. V. Izotopnyi sostav svintsya daek i rud Vorontsovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Severnii Ural) [Isotopic composition of lead from dikes and ores of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)], *Litosfera [Lithosphere]*, 2020, V. 20, No 3, pp. 386–396. (In Russ.).
8. Murzin V. V., Sazonov V. N., Ronkin Yu. L. Model' formirovaniya Vorontsovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya na Urale (karlinskii tip): novye dannye i problemy [A formation model of the Vorontsovskoe gold deposit in the Urals (Carline type): New data and problems], *Litosfera [Lithosphere]*, 2010, No 6, pp. 66–73. (In Russ.).
9. Olli A. I. K voprosu o shirotnoi tektonicheskoi poyasnosti Urala [On the problem of the latitudinal tectonic belt of the Urals], *Sovetskaya geologiya [Soviet geology]*, 1966, No 7, pp. 36–44. (In Russ.).
10. Puchkov V. N. Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Cis-Urals (actual issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics



- and metallogeny)], Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 2010, 280 p.
11. Sazonov V. N., Murzin V. V., Grigor'ev N. A. Vorontsovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie – primer mineralizatsii karlinskogo tipa na Urale [Vorontsov gold deposit – an example of mineralization of the Carlin type in the Urals], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 1998, V. 40, No 2, pp. 157–170. (In Russ.).
 12. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu. A. Problema “molodogo” endogenno zolota na Urale [To the problem of “young” hypogenic gold in the Urals], *Litosfera* [Lithosphere], 2005, No 1, pp. 128–134. (In Russ.).
 13. Chervyakovskii G. F., Tavrin I. F., Yarosh A. Ya., Anan'eva E. M., Dorofeev B. F., Radionov P. F. Shirotnye i subshirotnye struktury Urala [Latitudinal and sublatitudinal structures of the Urals], *Sovetskaya geologiya* [Soviet geology], 1966, No 11, pp. 34–43. (In Russ.).
 14. Cheremisin A. A., Zlotnik-Khotkevich A. G. Vorontsovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie [Vorontsovskoye gold deposit], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 1997, No 1, pp. 59–70. (In Russ.).
 15. Almeida C. M., Olivo G. R., Chouinard A., Weakly Ch., Poirier G. Mineral paragenesis, alteration, and geochemistry of the two types of gold ore and the host rocks from the Carlin-type deposits in the southern part of the Goldstrike Property, Northern Nevada: implications for sources of ore-forming elements, ore genesis, and mineral exploration, *Economic Geology*, 2010, V. 105, No 5, pp. 971–1004, DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.105.5.971>.
 16. Cline J. S., Hofstra F. F., Muntean J. L., Tosdal R. M., Hickey K. A. Carlin-type gold deposits in Nevada: critical geologic characteristics and viable models, *Economic Geology*, 2005, 100th Anniversary Volume, pp. 451–484.
 17. Fleet M. E., Mumin A. H. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis, *American Mineralogist*, 1997, V. 82, pp. 182–193.
 18. Murzin V. V., Naumov E. A., Azovskova O. B., Varlamov D. A., Rovnushkin M. Yu., Pirajno F. The Vorontsovskoe Au-Hg-As ore deposit (Northern Urals, Russia): Geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model, *Ore Geology Reviews*, 2017, V. 85, pp. 271–298.
 19. Ressel M. W., Henry C. D. Igneous geology of the Carlin Trend, Nevada: development of the eocene plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits, *Economic Geology*, 2006, V. 101, No 2, pp. 347–383.
 20. Sazonov V. N., Herk A. N., Boorder H. Spatial and temporal distribution of gold deposits in the Urals, *Economic Geology*, 2001, V. 96, pp. 685–703.
 21. Vikentyev I., Vikent'eva O., Blokov V., Azovskova O., Rovnushkin M., Murzin V. Mafic dykes of the Vorontsovka Carlin-style gold deposit and their role in ore control, Northern Urals, Russia, *Minerals*, 2023 (in press).
 22. Vikentyev I. V., Tyukova E. E., Vikent'eva O. V., Chugaev A. V., Dubinina E. O., Prokofiev V. Yu., Murzin V. V. Vorontsovka Carlin-style gold deposit in the North Urals: mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model, *Chemical Geology*, 2019, V. 508, pp. 144–166.
 23. Vikentyev I., Vikent'eva O., Tyukova E., Nikolsky M., Ivanova J., Sidorova N., Tonkacheev D., Abramova V., Blokov V., Spirina A., Borisova D., Palyanova G. Noble metal speciations in hydrothermal sulphides, *Minerals*, 2021, V. 11, Paper 488, pp. 1–69.

Викентьев Илья Владимирович (vikentevilya@gmail.com)

доктор геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник¹

Викентьева Ольга Владимировна кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник¹

Блоков Вячеслав Игоревич младший научный сотрудник¹, зам. заведующего отделом²

Выхристенко Роман Иванович младший научный сотрудник¹

Юшко Надежда Александровна кандидат геол.-минерал. наук, заведующая отделом²

Криночкин Лев Алексеевич доктор геол.-минерал. наук, заведующий отделом²

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва, Россия

² Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ), г. Москва, Россия