

**Первые находки медистого золота в рифейских отложениях  
Башкирского мегантиклинория (Южный Урал)**

©2022 С. В. Мичурин<sup>✉</sup>, А. А. Шарипова

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,  
ул. Карла Маркса, 16/2, 450077, Уфа, Российская Федерация*

**Аннотация**

*Введение:* В статье описываются находки самородного золота с высоким содержанием меди (32.9–38.2 мас. %), впервые обнаруженного в рифейских отложениях Башкирского мегантиклинория.

*Методы:* Электронная микроскопия с энергодисперсионным микроанализом; атомно-эмиссионный и рентгенофлуоресцентный анализы.

*Результаты и обсуждения:* В юго-западной части Башкирского мегантиклинория обнаружено медистое золото в трех значительно удаленных друг от друга местах: в Западно-Акташской рудной зоне, в Суранском селлаит-флюоритовом месторождении и в катавских известняках на р. Зилим. Медистое золото во всех местонахождениях характеризуется сходным редко встречающимся химическим составом, отвечающим составу  $Cu_3Au_2$ , с примесями Ag (4.7–7.4 мас. %) и Zn (~1 мас. %), иногда Fe (0.8 мас. %). Медистое золото всегда ассоциирует с халькопиритом, а вмещающие его породы обогащены Cu, реже – Ba, Zn, Pb, As. Температура его образования оценивается в 400–450°C. В Западно-Акташской зоне и Суранском месторождении медистое золото приурочено к эндо- или экзоконтактам габбродолеритов, которые по петрохимическим особенностям сходны с габбродолеритами позднерифейского инзерского комплекса и отличаются от габбродолеритов позднепалеозойского юрматинского комплекса более высокой щелочностью, меньшей известковистостью, более высокими содержаниями V, Zn и меньшими – Cr, Ni, Cu.

*Выводы:* Медистое золото в рифейских отложениях Башкирского мегантиклинория генетически связано с габбродолеритами позднерифейского инзерского комплекса и деятельностью постмагматических флюидов. Не исключается образование медистого золота в Западно-Акташской зоне и в катавских известняках на р. Зилим на ретроградной стадии скарнового процесса.

**Ключевые слова:** медистое золото, габбродолериты, скарны, Башкирский мегантиклинорий, Южный Урал.

*Источник финансирования:* работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ УФИЦ РАН № FMRS-2022-0015.

*Для цитирования:* Мичурин С. В., Шарипова А. А. Первые находки медистого золота в рифейских отложениях Башкирского мегантиклинория (Южный Урал) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2022. №3. С. 52–65. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/52-65>

**Введение**

Геохимические особенности самородного золота и присутствие в нем тех или иных элементов-примесей отражают условия его образования. В зависимости от геохимической среды и физико-

химических параметров флюидов золото может быть обогащено различными элементами-примесями [1, 2]. Медь является одной из основных изоморфных примесей в самородном золоте. Соединения системы Au–Cu обычно называют общим



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Мичурин Сергей Васильевич, e-mail: [s\\_michurin@mail.ru](mailto:s_michurin@mail.ru)

термином «медистое» золото [3]. Cu может образовывать с Au твердые растворы и интерметаллические соединения:  $Cu_3Au$  – аурикуприд (тетрагональный и кубический),  $CuAu$  – купроаурид (кубический), тетрааурикуприд (тетрагональный), рожковит (ромбический),  $CuAu_3$  – кубическая фаза (название не утверждено Международной минералогической ассоциацией) [4]. Поскольку в них почти всегда в той или иной степени входит серебро, они рассматриваются как трехкомпонентные твердые растворы Au–Cu–Ag [3].

Медистое золото с высокими содержаниями Cu (до 48.9 мас. % [4]) наиболее часто встречается в родинитах. В качестве эталонного объекта золотоносных родинитов рассматривается месторождение Золотая Гора на Южном Урале, связанное, как и все другие месторождения этого типа с альпинотипными гипербазитовыми массивами [5].

В последнее время описаны находки золота с высоким содержанием меди в южноуральских россыпных месторождениях [6], а также в россыпях на Северо-Востоке России [7, 8]. Вариации содержаний Cu в медистом золоте россыпей Малый Иремель и Нижний Карабаш на Южном Урале составляют от 6.7 до 18.7 мас. %. В качестве коренных источников россыпных месторождений с медистым золотом, как правило, рассматривают ультрабазитовые комплексы [9] или связанные с ними родиниты [7].

Кроме того, самородное золото с большими содержаниями меди встречается в скарновых месторождениях. В медно-скарновом месторождении Тардан в Алтае-Саянской складчатой области в самородном золоте установлено до 6 мас. % Cu, в скарновом редкометалльном месторождении Южно-Янгиканское (Узбекистан) – до 21.2 мас. % [1].

Минералы системы Cu–Au в заметных количествах встречаются в медно-никелевых месторождениях Норильского района [4]. Имеются сведения о находках аурикуприда в Au–Cu–порфириновых месторождениях: Кемесс (Британская колумбия, Канада) [10] и Елацит (Болгария) [2].

Нами обнаружено медистое золото с высоким содержанием Cu (31.3–40.9 мас. %) в отложениях рифея в юго-западной части Башкирского мегантиклинория (БМА) в трех различных местах (рис. 1); 1) в Юрматинском антиклинории в Западно-Акташской рудной зоне; 2) в Ямантауском антиклинории в Суранском селлаит-флюоритовом месторождении; 3) в Алатауском антиклинории в известняках катавской свиты. Места находок разобщены и удалены друг от друга на значительном расстоянии от 40 до 90 км. Вместе с тем медистое золото во всех местонахождениях имеет сходный химический состав. В статье предпринимается попытка выяснить условия его образования.

#### **Объекты исследования**

1. *Западно-Акташская рудная зона* располагается примерно в 60 км южнее пос. Тукан (см. рис. 1) вблизи Караташского регионального разлома. Включает Куртмалинское месторождение бурых железняков,

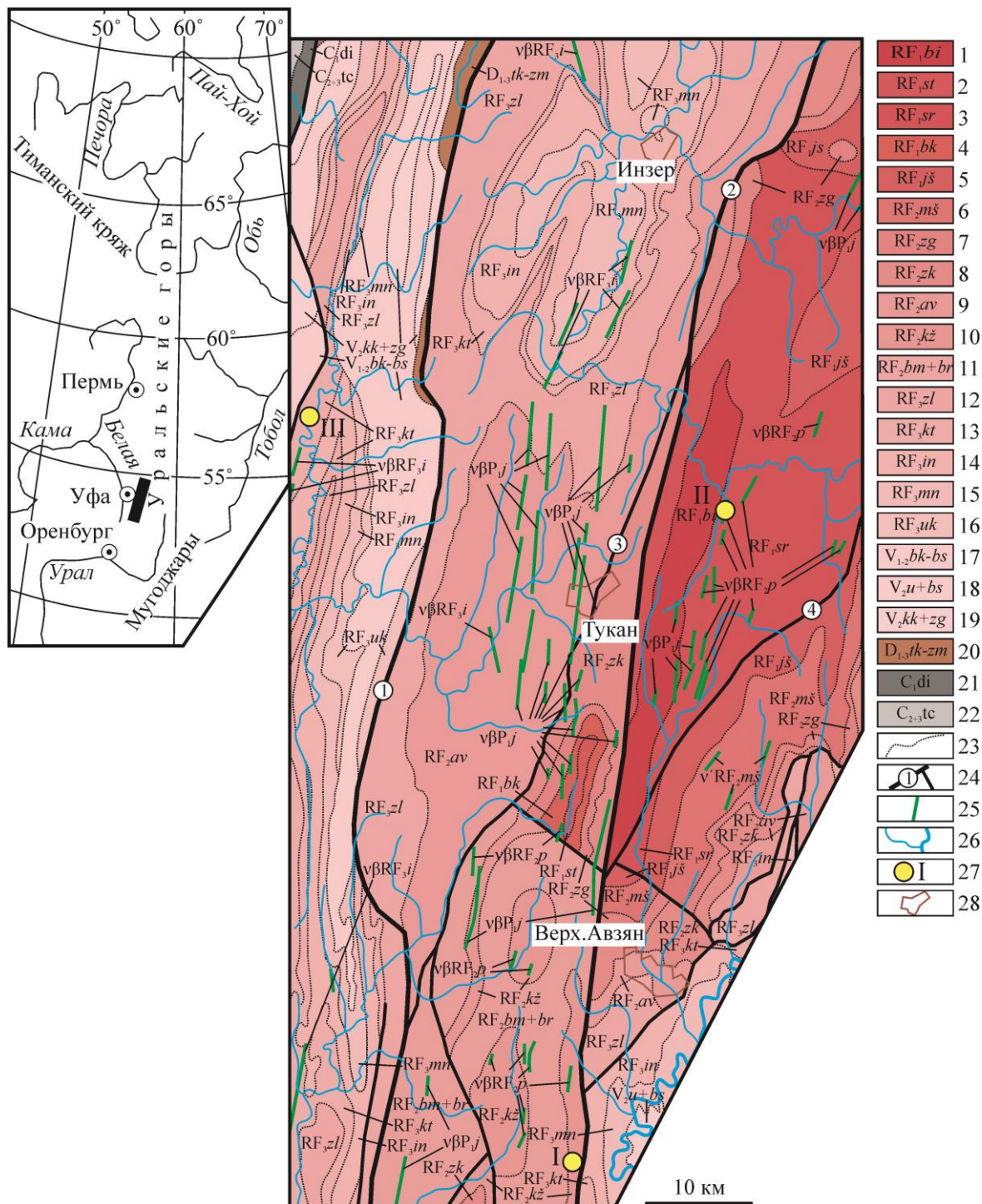
Западно-Акташское проявление золота, проявления барита (Байкай, Акташ-3) и меди (Безымянное, Южно-Акташское, Березовые Каши). Вмещающими породами зоны являются отложения кужинской и биктимирской свит, которые стратиграфически параллелизуются с авзянской свитой стратотипа среднего рифея [13].

Магматические образования зоны представлены дайками габбродолеритов, которые на сегодняшний день не имеют датировок абсолютного возраста. На геологической карте масштаба 1:200000 [12] они показаны в составе юрматинского габбродолеритового комплекса. Возраст комплекса считался раннедевонским на основании K–Ar датировок от 390 до 530 млн. лет [12, 13, 14]. Позднее Ю.Г. Князевым с соавторами [15] по цирконам из двух даек этого комплекса были получены изохроны  $284 \pm 2$  и  $292 \pm 2$  млн. лет, в связи с чем, на геологической карте масштаба 1:1000000 он переименован в ямантауский комплекс раннепермского возраста (см. рис. 1).

2. *Суранское селлаит-флюоритовое месторождение* расположено примерно в 12–14 км северо-восточнее пос. Тукан и приурочено к Восточно-Суранскому разлому (см. рис. 1). В месторождении в мергельных сланцах бердагуловской подсвиты суранской свиты нижнего рифея флюорит образует субсогласные жилы мощностью 0.5–8 м и прослеженных на глубину ~350 м. Выделено [16, 17] четыре генерации (типа) флюорита: серый фарфоровидный, темно-фиолетовый, зеленый, прозрачный. Селлаит совместно с зеленым флюоритом встречаются только в экзоконтакте с дайкой габбродолеритов, которая не имеет секущих контактов с флюоритовой жильной зоной, а примыкает к ней с западной стороны. Н.Н. Ларионовым с соавторами [12, 13] габбродолериты отнесены к юрматинскому комплексу, а Ю.Г. Князевым [15] – к повальненскому (1128–1004 млн. лет, K–Ar метод [14]).

Изучение различных геохимических особенностей флюоритов [17], показало, что ранние генерации серых и фиолетовых флюоритов отлагались из обогащенных фтором эвапоритовых рассолов, а зеленые флюориты, метасоматически замещающие ранние генерации флюорита и селлаит, имели другой источник фтора, предположительно связанный с гранитоидами. Возраст флюоритов указанными исследователями оценивается в  $1219 \pm 120$  млн. лет (Sm–Nd метод). Вместе с тем полученные K–Ar датировки флогопитов из апогаббровых метасоматитов и зеленых флюоритов (соответственно,  $769 \pm 20$  и  $623 \pm 20$  млн. лет), по мнению исследователей [18], отражают дорудную и послерудную возрастную границу образования селлаита и зеленого флюорита.

3. *Известняки катавской свиты верхнего рифея.* Обнажение расположено на левом берегу реки Зилим в 1 км западнее устья реки М. Толпар и примерно в 30 км северо-западнее пос. Тукан (см. рис. 1). В этом месте обнажаются красно-коричневые и серые известняки нижней подсвиты. В южной части обнажения породы падают на юго-запад, в северной – на восток.



**Рис. 1.** Геологическая карта юго-западной части БМА (по [11] с небольшими уточнениями) и места находок медистого золота: 1–5 – нижний рифей, свиты: 1 – большеинзерская; 2 – саткинская; 3 – суранская; 4 – бакальская; 5 – юшинская. 6–11 – средний рифей, свиты: 6 – машакская; 7 – зигальгинская; 8 – зигазино-комаровская; 9 – авзянская; 10 – кужинская; 11 – биктимирская, бретьякская объединенные. 12–16 – верхний рифей, свиты: 12 – зильмердакская; 13 – катавская; 14 – инзерская; 15 – миньярская; 16 – укская. 17–19 – венд, объединенные свиты: 17 – бакеевская, урюкская, басинская; 18 – урюкская, басинская; 19 – кукаркаузская, зиганская. 20–22 – палеозой: 20 – такатинская, ваяншинская, вязовская, койвенская, бийская, афонинская, чувсовская, челславская свиты девона нерасчленены; 21 – доломитово-известняковая толща карбона; 22 – терригенно-карбонатная толща карбона. 23 – границы свит. 24 – тектонические нарушения разного порядка, цифрами в кружках обозначены наиболее крупные разломы: 1 – Зильмердакский; 2 – Караташский взброс; 3 – Туканский надвиг; 4 – Большеавзянский надвиг. 25 – интрузивные образования габбродолеритовых комплексов: vRF<sub>2</sub>mš – машакский; vBRF<sub>2</sub>p – повальненский; vBRF<sub>2</sub>il – инзерский; vBP<sub>2</sub>j – ямантауский (юрматинский по [12], пояснения в тексте). 26 – реки и ручьи. 27 – места находок медистого золота: I – Западно-Акташская рудная зона; II – Суранское селлаит-флюоритовое месторождение; III – обнажения известняков катавской свиты верхнего рифея на левом берегу реки Зилим в 1 км западнее устья реки М. Толпар. 28 – населенные пункты.

**[Fig. 1.** Geological map of the south-western part of the BMA (according to [11] with minor corrections) and places of finds of cuprous gold: 1–5 – Lower Riphean, suites: (1) – Bolsheiner; (2) – Satka; (3) – Suran; (4) – Bakal; (5) – Yusha. 6–11 – Middle Riphean, suites: (6) – Mashak; (7) – Zigalga; (8) – Zigazino-Komarovo; (9) – Avzyan; (10) – Kuzha; (11) – Biktimir, Breyak combined. 12–16 – Upper Riphean, formations: (12) – Zilmerdak; (13) – Katav; (14) – Inzer; (15) – Minyar; (16) – Uk. 17–19 – Vendian, united formations: (12) – Zilmerdak; (13) – Katav; (14) – Inzer; (15) – Minyar; (16) – Uk. 20–22 – Paleozoic: (20) – Takatin, Vanyashkin, Vyazov, Koiven, Biy, Afonin, Chusov, Cheslav formations of the Devonian, undivided; (21) – dolomite-limestone sequence of the Carboniferous; (22) – terrigenous-carbonate sequence of the Carboniferous. 23 – boundaries of suites. 24 – tectonic faults of various order, the largest faults are indicated by numbers in circles: 1 – Zilmerdak fault; 2 – Karatash reverse fault; 3 – Tukan thrust; 4 – Bolsheavzyan overthrust. 25 – intrusive formations of gabbrodoleritic complexes:  $vRF_2m\bar{s}$  – Mashak;  $v\beta RF_2p$ , Povalnen;  $v\beta RF_3i$ , Inzer;  $v\beta P_{ij}$  – Yamantau (Yurmatian after [12], explanations in the text). 26 – rivers and streams. 27 – places of finds of cuprous gold: (I) – West Aktash ore zone; (II) – Suranskoe sellaite-fluorite deposit; (III) – limestone outcrops of the Upper Riphean Katav Formation on the left bank of the Zilim River, 1 km west of the mouth of the M. Tolpar River. 28 – settlements.]

Предполагаемая зона разрывного нарушения между породами, имеющими разные элементы залегания, задернована. Вблизи нее с южной стороны в микро- и тонкокристаллических известняках отмечаются кварцевые и кальцитовые жилы и прожилки мощностью до 3 см и протяженностью до 1 м. Магматические породы в обнажении не вскрываются. Однако, в ~2 км южнее катавские известняки прорывает субмеридионально протягивающаяся на несколько километров дайка габбродолеритов инзерского комплекса (см. рис. 1). U–Pb возраст комплекса составляет  $721 \pm 6,9$  млн. лет [15].

#### Методы исследования

Изучение состава минералов проводилось в полированных шлифах на электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энерго-дисперсионным анализатором Xplorer 15 Oxford Instruments. Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с использованием методики TrueQ. При съемке использованы: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 4 нА, время накопления спектра в точке 60 секунд в режиме «Point&ID», диаметр пучка составлял ~3 мкм.

Химический состав образцов определяли рентгенофлуоресцентным анализом на спектрометре VRA-30, аналитик Р.Р. Ахмедова. Определение Li, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb проводили спектральным атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (метод ИСП-АЭС) на спектрометре ICPE-9000 в ЦКД КМТНХ Института нефтехимпереработки (Уфа), аналитик А.М. Карамова. Предел обнаружения составлял 0.1–1 г/т.

#### Результаты исследования

1. *Западно-Акташская рудная зона.* Медистое золото обнаружено в дайке габбродолеритов в кварц-эпидотовых жилах и прожилках, развитых в ее западной эндоконтактной зоне (рис. 2а). Жилы, мощностью 6–7 см и протяженностью около 1.5 м, имеют г-образную форму и выклиниваются к краям. Главными минералами в жилах являются эпидот (40–65%) и кварц (30–55%). В небольшом количестве (<5%) в них присутствуют плагиоклаз, пироксен, амфибол, хлорит, цоизит, которые образуют несогласные скопления в реликтовых участках габбро.

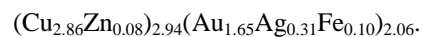
Эпидот, представленный идиоморфными индивидуальными размерами до 6–7 мм, замещает мелкозернистые

(20–100 мкм) агрегаты цоизита. С эпидотом пространственно ассоциируют редкие кристаллы магнетита, титанита, фторапатита размером от 20 до 100 мкм и халькопирита-1, который представлен преимущественно мелкими (2–20 мкм) ксеноморфными выделениями. Халькопирит-2 встречается в виде одиночных кристаллов размером до 5 мм, в которых отмечаются включения эпидота.

Кристаллы кварца идиоморфные, размером до 8 мм, с зональным строением, подчеркнутым распределением микропайкилитовых включений эпидота, редкого плагиоклаза и хлорита.

Зерна медистого золота, размером 2–25 мкм (рис. 3а, б), располагаются в виде цепочек, секущих эпидот и кварц. Минералы в кварц-эпидотовых жилах образовывались в следующей последовательности: мало-железистый эпидот → железистый эпидот + халькопирит-1 + магнетит + титанит + фторапатит → кварц → халькопирит-2 → самородное золото.

В химическом составе медистого золота из габбродолеритов Западно-Акташской рудной зоны установлены (в мас. %): Au (54.4–60.5), Cu (29.8–34.1), Ag (4.8–6.9), Zn (0.8–1.3), Fe (0–1.3) (табл. 1), его кристаллохимическая формула

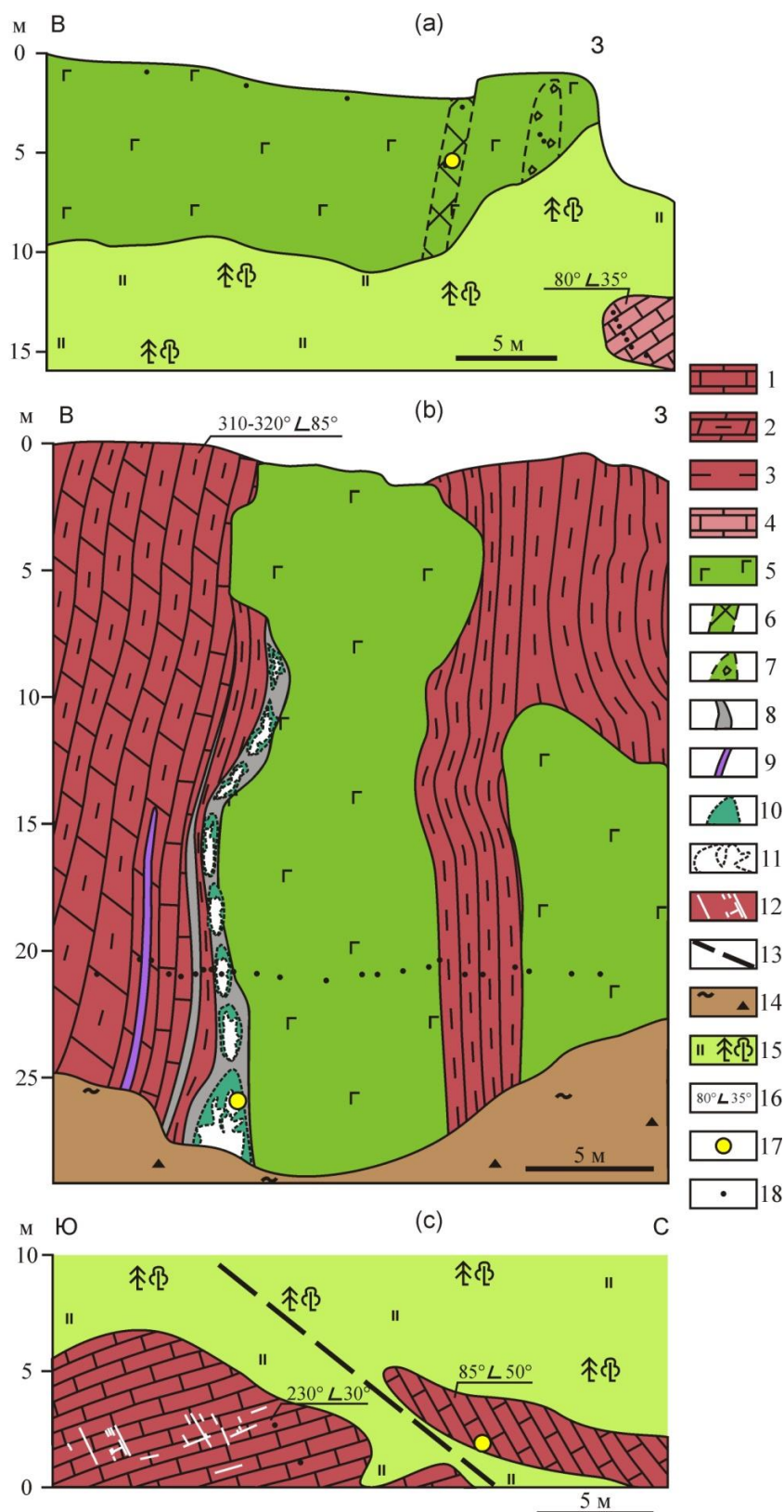


2. *Суранское селлаит-флюоритовое месторождение.* Медистое золото обнаружено в зеленом флюорите из селлаит-флюоритовой жилы на контакте с габбродолеритами (рис. 2б). По данным ИСП АЭС в зоне контакта породы обогащены Cu (до 1727 г/т), Ba (до 2153 г/т), Zn (до 1850 г/т), Pb (до 940 г/т).

Селлаит тяготеет к центральной части жилы, где образует массивные агрегаты длиннопризматических кристаллов белого цвета размером до 10 см. На границе зеленого флюорита и селлаита отмечаются извилистые ксеноморфные выделения маложелезистого доломита, а во флюорите фиксируются пойкилитовые включения селлаита.

Во флюорите часто развита вкрапленность кубических кристаллов пирита (до 3 мм) с примесью Co (до 0.5 мас. %), реже – Ni и As (до 0.27 мас. %), Cu (до 0.5 мас. %). В пирите отмечаются ксеноморфные выделения халькопирита размером до 50 мкм. Изредка они приурочены к зонам роста пирита (рис. 3д). Кроме того, иногда отмечаются крупные сегрегации халькопирита размером до 3 мм, приуроченные к границе флюорита и селлаита.





**Рис. 2.** Геологические разрезы обнажений с местоположением находок медистого золота: *a* – Западно-Акташская зона; *b* – Суранское месторождение; *c* – обнажение на р. Зилим. 1 – известняки; 2 – мергельные сланцы; 3 – сланцы; 4 – известковые скарны; 5 – габбродолериты; 6 – зона развития кварц-эпидотовых жил в габбродолеритах; 7 – магматические брекчии; 8–10 – флюориты: 8 – темно-серые; 9 – фиолетовые; 10 – зеленые; 11 – селлаит; 12 – кварцевые и кальцитовые жилы; 13 – предполагаемое разрывное нарушение; 14 – осьпь; 15 – растительный покров; 16 – элементы залегания пород; 17 – места обнаружения медистого золота; 18 – точки отбора проб.

[Fig. 2. Geological sections of outcrops with the location of copper gold finds: (a) – West Aktash zone; (b) – Suran field; (c) – outcrop on Zilim River. (1) – limestones; (2) – marl shales; (3) – shales; (4) – calcareous skarns; (5) – gabbrodolerites; (6) – zone of development of quartz-epidote veins in gabbrodolerites; (7) – igneous breccias; 8–10 – fluorites: (8) – dark gray; (9) – purple; (10) – green; (11) – sellaite; (12) – quartz and calcite veins; (13) – alleged discontinuous violation; (14) – scree; (15) – vegetation cover; (16) – elements of rock occurrence; (17) – places of discovery of cuprous gold; (18) – sampling points.]

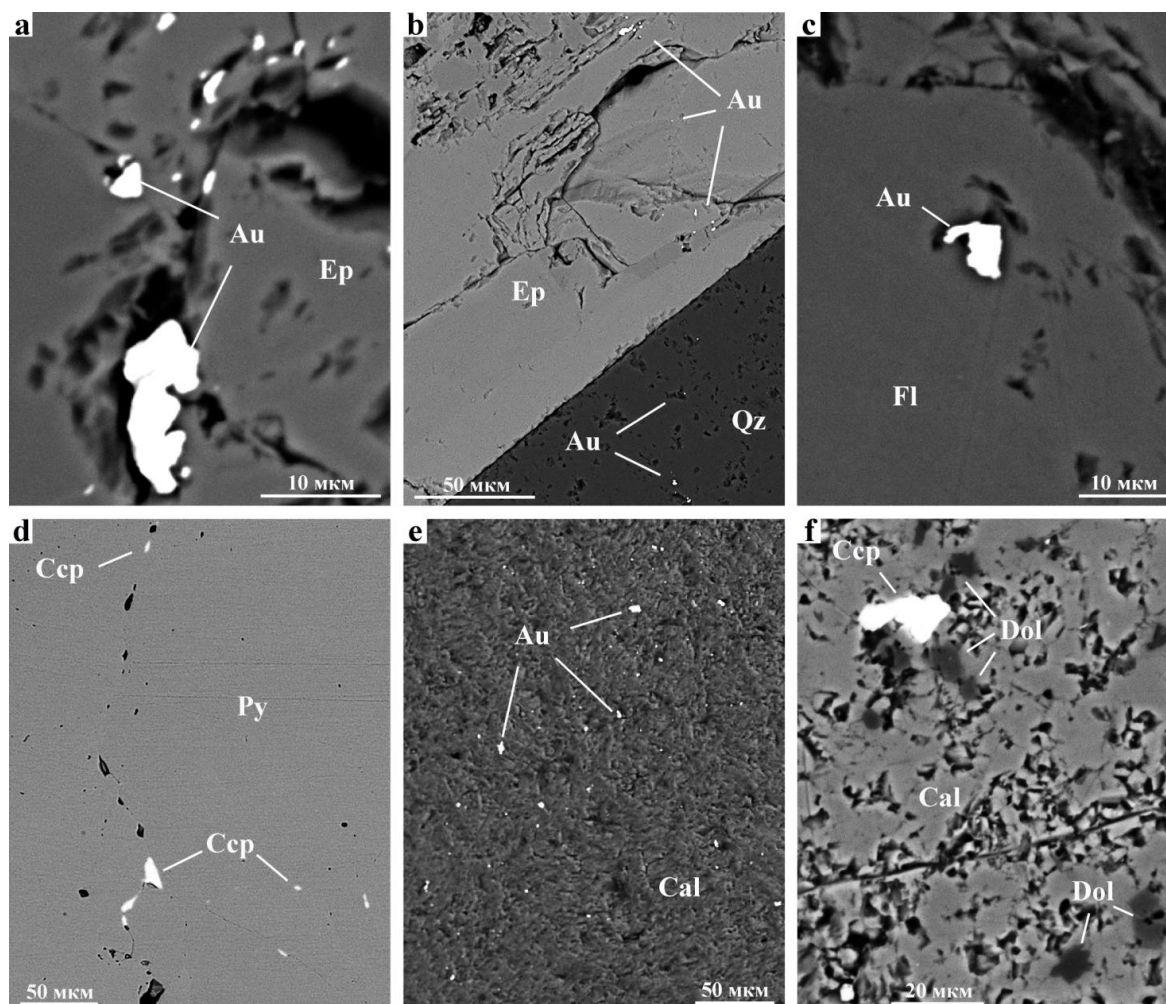


Рис. 3. Медистое золото в породах БМА на BSE-изображениях: a, b – Западно-Акташская зона; c, d – Суранское месторождение; e, f – катавские известняки на р. Зилим. Ep – эпидот; Qz – кварц; Fl – флюорит; Py – пирит; Ccp – халькопирит; Cal – кальцит; Dol – доломит; Au – самородное золото.

[Fig. 3. Cuprous gold in BMA rocks on BSE images: (a, b) – West Aktash zone; (c, d) – Suran deposit; (e, f) – Katavian limestones on the Zilim River. (Ep) – epidote; (Qz) – quartz; (Fl) – fluorite; (Py) – pyrite; (Ccp) – chalcopyrite; (Cal) – calcite; (Dol) – dolomite; (Au) – native gold.]

Табл. 1. Средние химические составы медистого золота в породах Башкирского мегантиклинория  
[Table 1. Average chemical compositions of cuprous gold in the rocks of the Bashkir meganticlinorium]

	Западно-Акташская зона (обр. м-2058, м-2058/1; n=25) [West Aktash zone (sample m-2058, m-2058/1; n=25)]	Суранское месторождение (обр. м-2217; n=4) [Suran deposit (sample m-2217; n=4)]	Катавские известняки (обр. Б-8; n=8) [Katav limestones (sample B-8; n=8)]
Au	58.76±1.14	58.05±2.55	55.80±2.39
Ag	5.95±0.47	7.41±0.37	4.65±0.20
Cu	32.91±1.13	33.05±2.55	38.23±2.09
Zn	1.00±0.09	1.03±0.08	0.89±0.44
Fe	0.78±0.39	нпо [bdl]	нпо [bdl]
Σ	99.37±0.38	99.54±0.32	99.57±0.26

Примечание: n – количество анализов; нпо – ниже предела обнаружения.  
[Note: n is the number of analyses; bdl – below the detection limit.]

Единичное зерно медистого золота размером около 10 мкм (рис. 3с) обнаружено во флюорите вблизи пирита. В этом же образце флюорита установлена обильная тонкая (3–15 мкм) рассеянная вкрапленность бастнезита-(Ce). Последовательность образования минералов в образце селлаит-флюоритовой жилы: селлаит → флюорит + пирит + халькопирит + доломит + бастнезит-(Ce) + самородное золото.

Химический состав медистого золота из зеленых флюоритов Суранского месторождения (в мас. %): Au (55.1–60.9), Cu (30.0–36.4), Ag (6.7–7.8), Zn (0.9–1.1) (см. табл. 1), кристаллохимическая формула  $(\text{Cu}_{3.20}\text{Zn}_{0.07})_{3.27}(\text{Au}_{1.50}\text{Ag}_{0.23})_{1.73}$ .

3. *Обнажение известняков катавской свиты на р. Зилим.* Медистое золото обнаружено в кальцитовом прожилке мощностью 3–4 мм в известняке из зоны предполагаемого разрывного нарушения (рис. 2с и рис. 3е). В микрокристаллическом пористом известняке вблизи прожилка отмечаются вкрапленники тонкокристаллического доломита (рис. 3ф), с которыми ассоциирует тонкая (3–60 мкм) многочисленная вкрапленность халькопирита. Содержание Cu (58 г/т) в этом образце известняка превышает кларк для карбонатов (4 г/т по К. Таркьяну и К. Ведеполу) в 14 раз. По удалению от разрывного нарушения содержания меди (14–21 г/т) в известняках уменьшаются.

Химический состав медистого золота из катавских известняков (в мас. %): Au (52.3–59.9), Cu (35.2–40.9), Ag (4.3–4.9), Zn (0.0–1.6) (см. табл. 1), кристаллохимическая формула  $(\text{Cu}_{2.89}\text{Zn}_{0.09})_{2.98}(\text{Au}_{1.64}\text{Ag}_{0.38})_{2.02}$ .

### Обсуждение результатов

*Химический состав медистого золота.* Медистое золото из трех различных мест БМА характеризуется практически идентичным химическим составом. Оно содержит близкие и значительные количества меди, примерно одинаковые количества серебра и цинка, его кристаллохимические формулы во всех случаях отвечают почти идеальному стехиометрическому составу  $\text{Cu}_3\text{Au}_2$ . В литературе имеются сведения о находках медистого золота подобного состава. В одной из россыпей Юглеровского рудно-россыпного узла на Северо-Востоке России обнаружена золотина размером около 200 мкм с высокими содержаниями меди (до 33.3 мас. %), серебра (до 8.0 мас. %) и цинка (до 4.2 мас. %) [8]. Она сложена в основном двумя фазами: по периферии –  $(\text{Cu}_{0.90}\text{Zn}_{0.12})_{1.02}(\text{Au}_{0.84}\text{Ag}_{0.14})_{0.98}$ , в центральной части –  $(\text{Cu}_{2.81}\text{Zn}_{0.19})_{3.00}(\text{Au}_{1.81}\text{Ag}_{0.19})_{2.00}$ . Последнюю из них указанный автор рассматривает как пока еще слабо исследованную самостоятельную фазу медистого золота. Однако в настоящее время не доказано существование соединения  $\text{Cu}_3\text{Au}_2$  как самостоятельного минерального вида. Оно обнаружено в месторождении Золотая гора (впервые) [19], в медно-никелевом месторождении Талнах [20], в аллювиально-элювиальных россыпях Уктусского базит-гипербазитового комплекса на Среднем Урале [21]. В последних двух случаях с примесью Pd±Rh в его составе и низ-

кими содержаниями серебра (<1 мас. %). Последующее изучение показало, что эти соединения соответствуют составу AuCu (ссылки в работах [4, 8]). Так, например, в работе [21] рентгенометрическими исследованиями установлено, что обнаруженное ими соединение  $\text{Cu}_{3.02}(\text{Au}_{1.91}\text{Fe}_{0.04}\text{Ag}_{0.01}\text{Pd}_{0.01}\text{Sb}_{0.01})_{1.98}$  представляет собой обогащенный медью тетраурикуприд.

Приведенные материалы показывают, что медистое золото в породах БМА характеризуется не только близким, но и сравнительно редким химическим составом. Это касается не только соотношения в нем главных компонентов, но и постоянно присутствующей одинаковой и сравнительно высокой примеси в нем цинка, который в таких соединениях, как отмечено в работе [8], исключительно редко встречается. Эти особенности позволяют связывать образование медистого золота, обнаруженного в разных местах БМА, с единым процессом.

*Геологические и геохимические особенности вмещающих пород.* Общей чертой местонахождений медистого золота в Западно-Акташской зоне и Суранском месторождении является их приуроченность к эндо- или экзоконтактам габбродолеритов. В катавских известняках на р. Зилим медистое золото обнаружено в зоне предполагаемого разлома, где магматические породы не обнажаются. Однако место находки располагается на линии простирания дайки габбродолеритов инзерского комплекса, поэтому логично предполагать, что медистое золото может быть приурочено к ее экзоконтактовой зоне. Общими минералогическими и геохимическими особенностями медистого золота из всех мест являются его пространственная ассоциация с халькопиритом и обогащенность вмещающих пород Cu, реже – Ba, Zn, Pb, As. Эти результаты согласуются с данными предыдущих исследований. Так, по материалам В.В. Радченко (Западно-Башкирская экспедиция) в Западно-Акташской зоне в восточной экзоконтактовой зоне габбродолеритов в гидротермально измененных песчаниках выявлено проявление меди, представленное густой вкрапленностью халькопирита, азурита, блеклой руды. В породах установлены значительные содержания Cu (до 6.2 мас. %), As (1.0 мас. %), Sb (1.0 мас. %), Ba (0.5 мас. %), Zn (0.16–0.3 мас. %), содержание Au равно 1 г/т. В Суранском месторождении в отдельных скважинах установлено увеличение содержания Ba до 3 мас. % и выявлены интервалы, обогащенные Pb (1 мас. %) и Cu (0.3–0.5 мас. %), а также установлено, что концентрации Au в пиритах составляют 4.3–12.4, Ag – 44.3 г/т [22].

Кроме того, необходимо отметить еще одну общую геохимическую особенность, а именно повышенные содержания F во вмещающих породах не только Суранского месторождения, но и Западно-Акташской рудной зоны, где ранее нами в западном экзоконтакте габбродолеритов установлены известковые скарны (см. рис. 2а) [23]. В них выделены ранняя (пироксен, гранат-1, флюорит) и поздние



(гранат-2, пренит, скаполит и др.) минеральные ассоциации, образованные в известняках в результате биметасоматического процесса при воздействии слабо- или умеренно кислых хлоридно-фторидных постмагматических флюидов и снижении температуры с 700–500°C до ~400°C. Характерно, что в скарнах в составе ранней генерации присутствует флюорит до 2.1 %.

*Связь с интрузивными образованиями.* Геологические и геохимические особенности свидетельствуют о генетической связи медистого золота в Западно-Акташской зоне и Суранском месторождении с габбродолеритами и деятельностью постмагматических флюидов, а его сходный специфичный химический состав из всех мест находок позволяет считать, что флюиды были связаны с одним и тем же комплексом магматических пород. Судя по значительной пространственной разобщенности местонахождений, этот комплекс должен быть широко развит.

В юго-западной части БМА наиболее широкое распространение имеют габбродолериты среднерифейского повальненского, позднерифейского инзерского и позднепалеозойского юрматинского (ямантауского по [11]) комплексов (см. рис. 1). Повальненский комплекс (1128–1004 млн. лет) при этом можно исключить из рассмотрения вследствие позднерифейского возраста отложений катавской свиты (938 млн. лет, K-Ag метод по глаукониту [24]). Между тем обращает на себя внимание, близость возраста магматических пород инзерского комплекса (721±6.9 млн. лет [15]) и времени формирования в Суранском месторождении зеленых флюоритов (следовательно, и сингенетичного им, по нашему мнению, медистого золота), которое происходило, как считается [18], между 769±20 и 623±20 млн. лет назад. Подчеркнем при этом, что отложения катавской свиты на р. Зилим недалеко от места обнаружения медистого золота прорывают габбродолериты именно инзерского комплекса.

Габбродолериты из Западно-Акташской зоны и Суранского месторождения по ряду петрохимических и геохимических особенностей (рис. 4, табл. 2) сходны между собой. В то же время они отличаются от габбродолеритов юрматинского комплекса. Отличия связаны, главным образом, с их более высокой щелочностью (особенно калиевостью) и меньшей известковистостью, а также с более высокими в них содержаниями V, Zr и меньшими – Cr, Ni, Cu. Между тем по указанным петрохимическим особенностям они сходны с габбродолеритами инзерского комплекса (см. табл. 2). Таким образом, можно сделать вывод, что образование медистого золота в породах БМА, наиболее вероятно, связано с габбродолеритами инзерского комплекса.

*Условия образования медистого золота.* Взаимная растворимость компонентов в твердых растворах Au–Cu–Ag уменьшается при падении температуры от 700 до 350°C [4, 25] и при температуре <350°C образующиеся фазы с низкими содержаниями серебра или меди становятся метастабильными [26, 27]. Для медистого золота из родингитов Агардагского гипербазитового массива температуры образования составляют 500–250°C [28], при этом в раннюю стадию формировалась ассоциация богатых медью сульфидов (халькозина и дигенита) и твердого раствора состава ~Au<sub>0.50</sub>Cu<sub>0.33</sub>Ag<sub>0.17</sub>, который впоследствии распался с образованием тетра-аурикуприда и электрума.

На диаграмме Au–Cu–Ag (рис. 5) фигуративные точки химического состава медистого золота из пород БМА попадают в одну узкую область между изотермами ликвидуса 400 и 500°C. Отметим при этом, что температура фазового перехода CuAu II (35–65 ат. % Au, т.е. Cu<sub>2</sub>Au–CuAu<sub>2</sub>) в CuAu I (40–60 ат. % Au, т.е. Cu<sub>3</sub>Au<sub>2</sub>–Cu<sub>2</sub>Au<sub>3</sub>) равна ~385°C [29]. Таким образом, можно приблизительно оценить температуру образования медистого золота из пород БМА в 400–450°C.

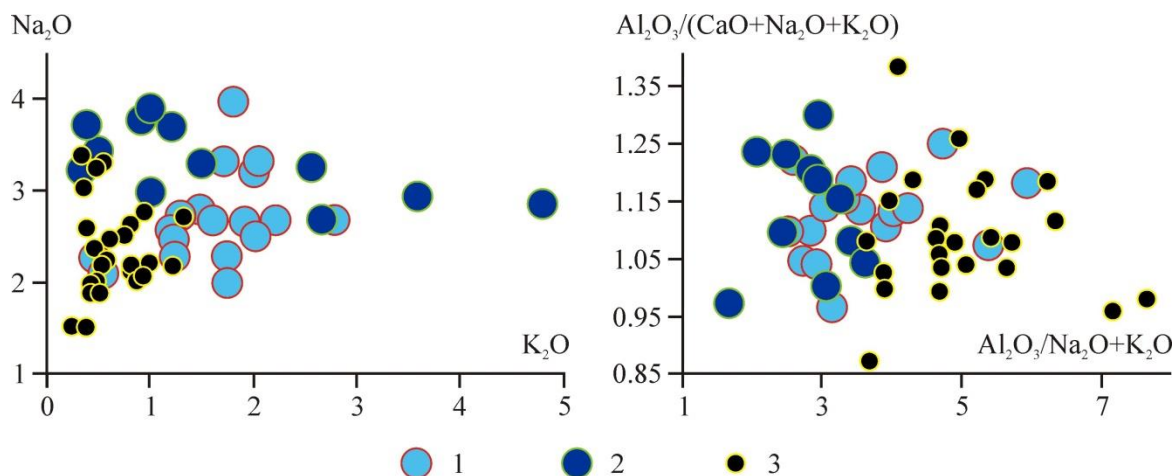


Рис. 4. Диаграммы K<sub>2</sub>O–Na<sub>2</sub>O и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) для габбродолеритов в юго-западной части БМА: 1 – Западно-Акташская зона; 2 – Суранское месторождение; 3 – юрматинский комплекс по [13].

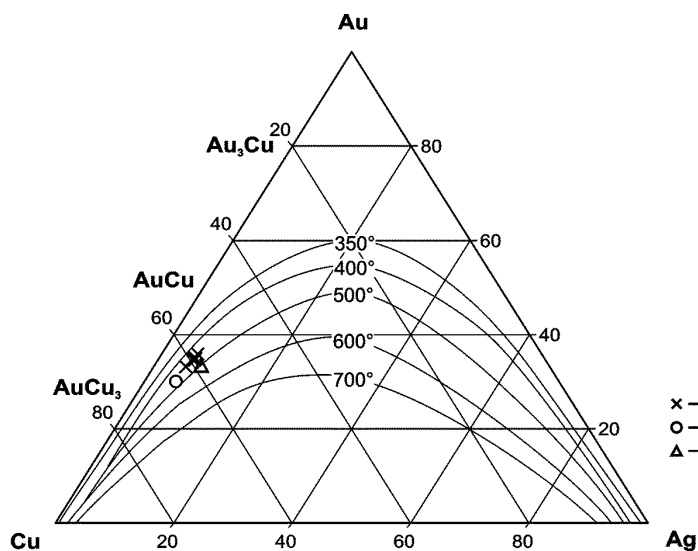
[Fig. 4. K<sub>2</sub>O–Na<sub>2</sub>O and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) diagrams for gabbrodolerites in the south-western part of the BMA: (1) – West Aktash zone; (2) – Suran deposit; (3) – Yurmatin complex according to [13].]



**Табл. 2.** Средние химические составы габбродолеритов (мас. %) в юго-западной части БМА и содержание в них V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb (г/т)  
**[Table 2.** Average chemical compositions of gabbrodolerites (wt %) in the south-western part of the BMA and content of V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb (g/t) in them]

	Западно-Акташская зона (19) [West Aktash zone (19)]	Суранское месторождение (12) [Suran deposit (12)]	Инзерский комплекс (6) по [14] [Inzer complex (6) along [14]]	Юрматинский комплекс (25) по [17] [Yurmatinsky complex (25) along [13]]
SiO <sub>2</sub>	48.200	46.948	49.830	48.574
TiO <sub>2</sub>	1.648	2.504	1.800	1.780
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.794	13.343	13.710	14.252
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.288	15.482	3.980	4.120
FeO	7.657	–	8.690	8.396
MnO	0.180	0.181	0.190	0.183
MgO	6.581	6.155	5.840	6.939
CaO	8.852	6.672	8.320	10.056
Na <sub>2</sub> O	2.750	3.335	2.700	2.388
K <sub>2</sub> O	1.584	1.691	1.930	0.634
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.132	0.233	0.240	0.197
ППП	2.116	3.409	2.540	–
сумма	99.794	99.953	99.770	97.173
V	291	396	–	225
Cr	87	56	–	164
Co	43	50	–	46
Ni	91	55	–	119
Cu	140	164	–	205
Zn	106	90	–	76
Pb	7	1	–	3

Примечание: в скобках указано количество образцов. Прочерк – нет данных.  
 [Note: the numbers in parentheses indicate the number of samples. Dash – no data.]



**Рис. 5.** Диаграмма Au–Cu–Ag (ат. %) с изотермами ликвидуса по [33] и положением фигуративных точек медистого золота БМА: 1 – Западно-Акташская зона; 2 – катавские известняки на р. Зилим; 3 – Суранское месторождение.

[Fig. 5. Diagram of Au–Cu–Ag (at %) with liquidus isotherms according to [33] and positions of figurative points of BMA cuprous gold: (1) – West Aktash zone; (2) – Katav limestones on Zilim River; (3) – Suran deposit.]

Эти температуры согласуются с температурами образования поздних минеральных ассоциаций (предположительно около 400°C [23]) в экзоконтактных скарнах в Западно-Акташской зоне и с тем, что медистое золото в кварц-эпидотовых жилах из

эндоконтакта габбродолеритов отлагалось в заключительную стадию минералообразования. Это позволяет предполагать отложение медистого золота в Западно-Акташской зоне на поздних стадиях скарнообразования.

Формирование минералов меди, с которыми ассоциирует золото в Cu-скарновых месторождениях, обычно связывают с ретроградными стадиями скарнового процесса [30, 31, 32]. Золотое оруденение в Cu-скарновых месторождениях многостадийно и формируется в связи со становлением сложных по составу (от габбро до гранитов) магматических комплексов, их длительным мантийно-коровым взаимодействием, сопровождающимся увеличением кислотности и щелочности магматических пород (в частности, калиевости), и реализацией каждой стадии рудообразующего процесса в постмагматический период становления дайковых тел [34].

В то же время считается [4], что золото в процессах скарнообразования инертно и скарны содержат существенные количества Au только в тех участках, где они лиственитизированы. При этом процессы лиственитизации генетически не связаны со скарнообразованием, а отделены от него внедрением других генераций даек и формированием Mo-Cu-порфирового оруденения.

По нашим данным, содержания Au в скарнах Западно-Акташской зоны составляют менее 0.1 г/т. В то же время сравнительно большие концентрации Au (0.3–2.5 г/т) выявлены в эндоконтактовой зоне габбродолеритов в эпидот-кварцевых жилах, содержащих медистое золото, а также в шлиховых пробах (0.15–0.3 г/т), отобранных из руч. Акташский ниже по течению от дайки габбродолеритов [23]. Согласно геологическим наблюдениям (см. рис. 2а), эпидот-кварцевые жилы в габбродолеритах развиваются вблизи магматических брекчий неясного генезиса, а по не подтвержденным материалам Л.Г. Кушировой и В.А. Филипова (АО «Башкиргеология») в Западно-Акташской зоне встречаются дайки кварцевых диоритов и дайка изменчивого состава от габбродолеритов до граносиенитов. Все это указывает на возможно более сложный состав магматических образований зоны и более сложное развитие в ней рудных процессов.

Вместе с тем приведенные данные не исключают связи образования медистого золота в Западно-Акташской зоне с поздними стадиями скарнового процесса. Возможно, медистое золото из катавских известняков на р. Зилим также связано со скарнообразованием. Золото в карбонатных породах может отлагаться на значительном удалении (до 1.5 км) от интрузивных пород, являясь дистальной фацией Au-Cu скарновых месторождений [32]. В месторождениях этого типа часто фиксируется зональность относительно связанных с ними интрузий, проявленная в масштабах от сантиметров до километров [31].

Сравнение температур образования медистого золота с температурами формирования флюоритов Суранского месторождения в настоящее время затруднительно. В них по результатам детальных микротермометрических исследований не обнаружено первичных флюидных включений [35]. Форма и расположение флюидных включений указывают на их вторич-

ный характер, а температуры гомогенизации в зеленых флюоритах находятся в интервале 130–160°C.

### Выводы

В юго-западной части в отложениях рифея БМА обнаружено медистое золото в трех значительно удаленных друг от друга местах: в Западно-Акташской рудной зоне, в Суранском селлаит-флюоритовом месторождении и в катавских известняках на р. Зилим. Самородное золото во всех местонахождениях характеризуется сходным редко встречающимся химическим составом, отвечающим составу  $Cu_3Au_2$ , с примесями Ag (4.7–7.4 мас. %) и Zn (~1 мас. %), иногда Fe (0.8 мас. %). Оно всегда находится в ассоциации с халькопиритом, а вмещающие его породы обогащены Cu, реже – Ba, Zn, Pb, As. Температура его образования оценивается в 400–450°C.

В Западно-Акташской зоне и Суранском месторождении медистое золото приурочено к эндо- или экзоконтактам габбродолеритов, которые по петрохимическим особенностям сходны с габбродолеритами позднерифейского инзерского комплекса и отличаются от габбродолеритов позднепалеозойского юрматинского комплекса более высокой щелочностью, меньшей известковистостью, более высокими содержаниями V, Zn и меньшими – Cr Ni, Cu. Наиболее вероятно, что генетически оно связано с габбродолеритами позднерифейского инзерского комплекса и деятельностью постмагматических флюидов. Не исключается образование медистого золота в Западно-Акташской зоне и в катавских известняках на р. Зилим на ретроградной стадии скарнового процесса.

*Конфликт интересов:* Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гаськов И.В. Главные элементы-примеси самородного золота и связь их с условиями его образования на примере месторождений складчатых поясов Азии // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 9. С. 1359–1376. DOI: 10.1016/j.rgg.2017.08.004
2. Chapman R.J., Banks D.A., Styles M.T., Walshaw R.D., Piazzolo S., Morgan D.J., Grimshaw M.R., Spence-Jones C.P., Matthews T.J., Borovinskaya O. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies // *Mineralium Deposita*. 2021. Vol. 56. P. 1563–1588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01036-x>
3. Чудненко К.В., Пальянова Г.А. Термодинамические свойства твердых растворов в системе Ag–Au–Cu // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55. № 3. С. 449–463. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.01.016
4. Спиридонов Э.М., Плетнев П.А. Месторождение медистого золота Золотая Гора (о "золото-родингитовой" формации). М.: Научный Мир. 2002. 216 с.
5. Мурзин В.В., Сазонов В.Н., Варламов Д.А., Шанина С.Н. Золотое оруденение в родингитах массивов альпинотипных гипербазитов // *Литосфера*. 2006. № 1. С. 113–134.
6. Zaykov V.V., Melekestseva I.Y., Zaykova E.V., Kotlyarov V.A., Kraynev Y.D. Gold and platinum group minerals in plac-

- ers of the South Urals: Composition, microinclusions of ore minerals and primary sources // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 85. P. 299–320.
7. Сидоров Е.Г., Сандмирова Е.И., Чубаров В.М., Аникин Л.П., Ибрагимова Э.К., Антонов А.В. Типоморфные особенности золота россыпных проявлений реки Ольховая 1-я (Камчатский мыс, Восточная Камчатка) // *Вестник КРА-УНЦ. Науки о Земле*. 2013. Вып. № 21. № 1. С. 34–43.
  8. Литвиненко И.С. Медистое золото и серебряно-золотая амальгама в россыпях Юглеровского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) // *Вестник ДВО РАН*. 2016. № 5. С. 59–68.
  9. Молчанов В.П., Молчанова Н.Н. Золото-ильменитовые россыпи интрузий ультрабазитов Сихотэ-Алиня: минералогия, геохимия и происхождение // *Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2020. № 17. С. 364–368.
  10. Chryssoulis S.L., McMullen J. Mineralogical investigation of gold ores // *Project Development Developments in Mineral Processing*. 2016. P. 57–93.
  11. Князев Ю.Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Геологическая карта доплиоценовых образований. N-40 (Уфа). СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2010.
  12. Ларионов Н.Н., Цветкова А.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:200000. Южно-Уральская серия. N-40-XXII (Тузан). СПб.: МПР РФ, 2003.
  13. Ларионов Н.Н., Бергазов И. Р. Грановская Н.В., Нигматуллина А.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-40-XXII – Тузан. Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015.
  14. Алексеев А.А. Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. М.: Наука, 1984. 136 с.
  15. Князев Ю.Г., Князева Ю.Г., Сначев В.И., Каримов Т.Р., Масагутов Р.Х., Быкова Л.С., Утаев М.А., Айдаров Э.М., Алсланова Э.Р. Отчет о результатах работ по объекту: «Создание комплекта Государственной геологической карты масштаба 1:1000000 листа N-40-Уфа». Уфа, 2010.
  16. Ларионов Н.Н., Настасиенко Е.В., Смолянский П.Л., Сомов М.М. О новом типе селлаит-флюоритовой минерализации // *Минералогический журнал*. 1987. Т. 9. С. 22–25.
  17. Крупенин М.Т., Прохаска В., Ронкин Ю.Л. Природа фтора и рудообразующих растворов флюоритового месторождения Суран (Башкирский мегантиклинорий) по данным изучения лантаноидов, флюидных включений и Sr-Nd систематики // *Литосфера*. 2012. № 5. С. 126–144.
  18. Настасиенко Е.В., Сомов М.М. Структурная позиция флюоритового оруденения Западно-Уральского региона и условия локализации рудных тел // *Условия локализации сурьмяно-ртутного и флюоритового оруденения в рудных полях*. Новосибирск: Наука, 1991. С. 141–148.
  19. Ложечкин М.П. Карабашское месторождение медистого золота // *Проблемы геохимии основных магм*. Труды УФ АН СССР, Изд-во Свердловск: УФ АН СССР, 1935. Вып. 4. С. 35–44.
  20. Разин Л.В. Минералы – природные сплавы золота и меди в рудах медно-никелевых месторождений Норильского типа // *Труды минералогического музея им. А.Е. Ферсмана*. 1975. Вып. 24. С. 93–106.
  21. Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G., Krause J., Dvornik G.P., Stanley C., Bindi L. Platinum-group minerals (PGM) nuggets from alluvial-eluvial placer deposits in the concentrically zoned mafic-ultramafic Uktus complex (Central Urals, Russia) // *Eur. J. Mineral.* 2013. Vol. 25. P. 519–531.
  22. Бигнов Р.И., Макушин А.А., Казаков И.И., Чебан С.Г. Роль глубинной структуры в размещении нефтегазовых, рудных месторождений и новых перспективных зон Республики Башкортостан // *Геология и перспективы расширения сырьевой базы Башкортостана и сопредельных территорий: материалы IV Республиканской геологической конференции*. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2001. Т. 2. С. 3–26.
  23. Мичурин С.В., Калистратова Е.О., Султанова А.Г., Крупенин М.Т., Даниленко С.А., Савельев Д.Е., Казбулатова Г.М. Известковые скарны в среднерифейских отложениях Акташской площади (Южный Урал) // *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: сб. ст. 13-ой Межрегиональной научно-практической конференции*. Уфа: Мир печати, 2020. С. 94–106.
  24. Козлов В.И., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д. Новая схема расчленения разреза параметрической скважины 1 Кулгунинская (Южный Урал). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2011. 60 с.
  25. Chang Y.A., Goldberg D., Neumann J.P. Phase diagrams and thermodynamic properties of ternary gold-copper-silver systems // *J. Phys. Chem. Reference Data*. 1977. Vol. 6. P. 621–669.
  26. Мурзин В.В., Малюгин А.А. Новые данные о нестабильности природных твердых растворов системы Au–Ag–Cu в области температур менее 350°C // *Доклады АН СССР*. 1983. Т. 269. № 3. С. 723–724.
  27. Knight J., Leitch C.H.V. Phase relations in the system Au–Cu–Ag at low temperatures based on natural assemblages // *The Canadian Mineralogist*. 2001. Vol. 39. P. 889–905.
  28. Мурзин В.В., Пальянова Г.А., Варламов Д.А., Шанина С.Н. Золотоносные родингиты Агардагского массива гипербазитов (Ю. Тува, Россия) и проблемы их генезиса // *Геология рудных месторождений*. 2020. Т. 62. № 3. С. 224–246.
  29. Okamoto H., Chakrabarti D.J., Laughlin D.E., Massalski T.B. The Au-Cu (goldcopper) system // *Bull. Alloy Phase Diagrams*. 1987. Vol. 8. P. 453–474.
  30. Ray G.E. A review of skarns in the Canadian Cordillera. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Open File 2013-08. 2013. 50 p.
  31. Xie G., Mao J., Richards J.P., Han Y., Fu B. Distal Au Deposits Associated with Cu-Au Skarn Mineralization in the Fengshan Area, Eastern China // *Economic Geology*. 2019. Vol. 114. No 1. P. 127–142.
  32. Sint N.N., Yonezu K., Tindell T., Aye M.T., Win H., Imai A., Watanabe K. Geology and Skarn Cu–Bi–Au Mineralization at Shwe Min Bon Area, Kalaw Township, Southern Shan State, Myanmar // *Resource Geology*. 2019. V. 69. No 1. P. 85–106.
  33. Дриц М.Е., Бочвар Н.Р., Гузей Л.С., Лысова Е.В. Двойные и многокомпонентные сплавы на основе меди. М.: Наука, 1979. 248 с.
  34. Гаськов И.В., Борисенко А.С., Бабич В.В., Наумов Е.А. Стадийность и длительность формирования золоторудной минерализации на медно-скарновых месторождениях (Алтае-Саянская складчатая область) // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 10. С. 1399–1412. DOI: 10.1016/j.rgg.2010.09.001
  35. Dzwillo R. Anwendbarkeit microthermometrischer untersuchungen an sediment-hosted lagerstten aus dem proterozoicum des Westurals. Diplomarbeit. Free Universitet Berlin. Institut fur Geologie. Berlin. 2000. 56 p.

## **The first finds of cuprous gold in the Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium (Southern Urals)**

©2022 S. V. Michurin✉, A. A. Sharipova

*Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the RAS,  
16/2 Karl Marx st., 450077, Ufa, Russian Federation*

### **Abstract**

*Introduction:* The article describes finds of native gold with a high content of copper (32.9–38.2 wt. %), first discovered in the Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium.

*Methods:* Electron microscopy with energy dispersive microanalysis; atomic emission and X-ray fluorescence analyses were used in the study.

*Results and discussions:* In the south-western part of the Bashkir meganticlinorium cuprous gold was discovered in three places significantly remote from each other: in the West Aktash ore zone, in the Suran sellaite-fluorite deposit, and in the Katav limestones on the Zilim River. Cuprous gold in all localities is characterized by a similar rare chemical composition corresponding to the composition of  $Cu_3Au_2$ , with impurities of Ag (4.7–7.4 wt. %) and Zn (~1 wt. %), sometimes Fe (0.8 wt. %). Cuprous gold is always associated with chalcopyrite, and its host rocks are enriched in Cu, less often in Ba, Zn, Pb, and As. The temperature of its formation is estimated at 400–450°C. In the West Aktash zone and the Suran deposit, copper gold is confined to endo- or exocontacts of gabbrodolerites, which, in terms of petrochemical features, are similar to gabbrodolerites of the Late Riphean Inzer complex and differ from gabbrodolerites of the Late Paleozoic Yurmatinsk complex in higher alkalinity, lower calcareous content, higher contents of V and Zn, and lower contents of Cr, Ni, and Cu.

*Conclusions:* Cuprous gold in the Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium is genetically related to the gabbrodolerites of the late Riphean Inzer complex and the activity of postmagmatic fluids. The formation of cuprous gold in the West Aktash zone and in the Katav limestones on the Zilim River at the retrograde stage of the skarn process is not excluded.

**Keywords:** cuprous gold, gabbrodolerites, skarns, Bashkir meganticlinorium, Southern Urals.

*Funding:* The work was carried out within the framework of the State Assignment of the IG UFRC RAS No. FMRS-2022-0015.

*For citation:* Michurin S.V., Sharipova A.A. The first finds of cuprous gold in the Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium (Southern Urals). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 3, pp. 52–65. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/52-65>

*Conflict of interests:* The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Sergey V. Michurin, e-mail: [s\\_michurin@mail.ru](mailto:s_michurin@mail.ru)



## REFERENCES

- Gas'kov I.V. Major impurity elements in native gold and their association with gold mineralization settings in deposits of Asian folded areas. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no 9, pp. 1080–1092. DOI: 10.1016/j.rgg.2017.08.004
- Chapman R.J., Banks D.A., Styles M.T., Walshaw R.D., Pia-zolo S., Morgan D.J., Grimshaw M.R., Spence-Jones C.P., Matthews T.J., Borovinskaya O. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies. *Mineralium Deposita* 56, 2021, pp. 1563–1588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01036-x>
- Chudnenko K.V., Pal'yanova G.A. Thermodynamic properties of solid solutions in the Ag-Au-Cu system. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no 3, pp. 349–360. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.01.016
- Spiridonov E.M., Pletnev P.A. *Mestorozhdenie medistogo zolota Zolotaya Gora (o "zoloto-rodingitovoi" formatsii)* [Copper gold deposit Zolotaya Gora (about the "gold-rodingite" formation)]. Moscow, Nauchnyi Mir publ., 2002, 216 p. (In Russ.)
- Murzin V.V., Sazonov V.N., Varlamov D.A., Shanina S.N. Zolotoe orudnenie v rodingitakh massivov al'pinotipnykh giperbazitov [Gold mineralization in rodingites of massifs of alpine-type ultramafic]. *Litosfera*, 2006, no 1, pp. 113–134. (In Russ.)
- Zaykov V.V., Melekestseva I.Y., Zaykova E.V., Kotlyarov V.A., Kraynev Y.D. Gold and platinum group minerals in placers of the South Urals: Composition, microinclusions of ore minerals and primary sources. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 85, pp. 299–320.
- Sidorov E.G., Sandimirova E.I., Chubarov V.M., Anikin L.P., Ibragimova E.K., Antonov A.V. Tipomorfnye osobennosti zolota rossypanykh proyavlenii reki Ol'khovaya 1-ya (Kamchatskii mys, Vostochnaya Kamchatka) [Typomorphic features of gold in placer occurrences of the Olkhovaya 1st River (Kamchatsky Cape, Eastern Kamchatka)]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle – Proceedings of Kamchatka Regional Association. Series: Earth Sciences*, 2013, no 1, vypusk no 21, pp. 34–43. (In Russ.)
- Litvinenko I.S. Medistoe zoloto i serebryano-zolotaya amal'gama v rossypanykh Yuglerovskogo rudno-rossypanogo uzla (Severo-Vostok Rossii) [Cuprous gold and silver-gold amalgam in the placers of the Yuglerovsky ore-placer cluster (North-East of Russia)]. *Vestnik DVO RAN – Proceedings of Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences*, 2016, no 5, pp. 59–68. (In Russ.)
- Molchanov V.P., Molchanova N.N. Zoloto-il'menitovye rossypi intruzii ul'trabazitov Sikhote-Alinya: mineralogiya, geokhimiya i proiskhozhdenie [Gold-ilmenite placers of ultramafic intrusions of the Sikhote-Alin: mineralogy, geochemistry and origin]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN*, 2020, no 17, pp. 364–368. (In Russ.)
- Chryssoulis S.L., McMullen J. Mineralogical investigation of gold ores. *Project Development Developments in Mineral Processing*, 2016, pp. 57–93.
- Knyazev Yu.G. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:1000000 (tret'e pokolenie). Ural'skaya seriya. Geologicheskaya karta dopliotsenovykh obrazovaniy. N-40 (Ufa)* [State geological map of the Russian Federation, scale 1: 1000000 (third generation). Ural series. Geological map of pre-Pliocene formations. N-40 (Ufa)]. Saint Petersburg, FGUP «VSEGEI», 2010. (In Russ.)
- Larionov N.N., Tsvetkova A.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. 1:200 000. Yuzhno-Ural'skaya seriya. N-40-XXII (Tukan)* [State geological map of the Russian Federation. 1:200000. South Ural series. N-40-XXII (Toucan)]. Saint Petersburg, MPR RF, 2003. (In Russ.)
- Larionov N.N., Bergazov I. R. Granovskaya N.V., Nigmatullina A.M. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi federatsii. Masshtab 1:200 000. Izdanie vtoroe. Seriya Yuzhno-Ural'skaya. List N-40-XXII – Tukan. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Second edition. Series South Ural. Sheet N-40-XXII – Toucan. Explanatory note]. Moscow, MF VSEGEI, 2015. (In Russ.)
- Alekseev A.A. *Rifeisko-vendskii magmatizm zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala* [Riphean-Vendian magmatism of the western slope of the Southern Urals]. Moscow, Nauka publ., 1984, 136 p. (In Russ.)
- Knyazev Yu.G., Snachev V.I., Karimov T.R., Masagutov R.Kh., Bykova L.S., Utaev M.A., Aidarov E.M., Alslanova E.R. Otchet o rezul'tatakh rabot po ob'ektu: «Sozдание kompleksa Gosudarstvennoi geologicheskoi karty masshtaba 1:1000000 lista N-40-Ufa» [Report on the results of work on the object: "Creation of a set of the State Geological Map at a scale of 1: 1000000 sheet N-40-Ufa"]. Ufa, 2010. (In Russ.)
- Larionov N.N., Nastasienko E.V., Smolyanskii P.L., Comov M.M. O novom tipe sellait-flyuoritovoi mineralizatsii [On a new type of sellait-fluorite mineralization]. *Mineralogicheskii zhurnal*, 1987, vol. 9, pp. 22–25. (In Russ.)
- Krupenin M.T., Prokhaska V., Ronkin Yu.L. Priroda flora i rudoobrazuyushchikh rastvorov flyuoritovogo mestorozhdeniya Suran (Bashkirskii megantiklinorii) po dannym izucheniya lantanoidov, flyuidnykh vkluchenii i Sr-Nd sistematiki [The nature of fluorine and ore-forming solutions of the Suran fluorite deposit (Bashkir meganticlinorium) according to the study of lanthanides, fluid inclusions and Sr-Nd systematics]. *Litosfera*, 2012, no 5, pp. 126–144. (In Russ.)
- Nastasienko E.V., Somov M.M. Strukturnaya pozitsiya flyuoritovogo orudneniya Zapadno-Ural'skogo regiona i usloviya lokalizatsii rudnykh tel [Structural position of fluorite mineralization in the West Ural region and localization conditions for ore bodies]. *Usloviya lokalizatsii sur'myano-rtutnogo i flyuoritovogo orudneniya v rudnykh polyakh*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, pp. 141–148. (In Russ.)
- Lozhechkin M.P. Karabashskoe mestorozhdenie medistogo zolota [Karabashskoe copper gold deposit]. *Problemy geokhimii osnovnykh magm. Tr. UF AN SSSR; vyp. 4. Sverdlovsk, UF AN SSSR Publ.*, 1935, pp. 35–44. (In Russ.)
- Razin L.V. Mineraly – prirodnye splavy zolota i medi v rudakh medno-nikelevykh mestorozhdenii Noril'skogo tipa [Minerals - natural alloys of gold and copper in ores of copper-nickel deposits of the Norilsk type]. *Trudy mineralogicheskogo muzeya im. A.E. Fersmana*. 1975, vol. 24, pp. 93–106. (In Russ.)
- Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G., Krause J., Dvornik G.P., Stanley C., Bindi L. Platinum-group minerals (PGM) nuggets from alluvial-eluvial placer deposits in the concentrically zoned mafic-ultramafic Uktus complex (Central Urals, Russia). *Eur. J. Mineral.*, 2013, vol. 25, pp. 519–531.
- Bignov R.I., Makushin A.A., Kazakov I.I., Cheban S.G. Rol' glubinnoi struktury v razmeshchenii neftegazovykh, rudnykh mestorozhdenii i novykh perspektivnykh zon Respubliki Bashkortostan [The role of the deep structure in the location of oil and gas, ore deposits and new promising zones of the Republic of Bashkortostan]. *Geologiya i perspektivy rasshireniya syr'evoi bazy Bashkortostana i sopredel'nykh territorii: materialy [IV Republican geology conference]*. Ufa, IG UNTs RAN Publ., 2001, vol. 2, pp. 3–26. (In Russ.)
- Michurin S.V., Kalistratova E.O., Sultanova A.G., Krupenin M.T., Danilenko S.A., Savel'ev D.E., Kazbulatova G.M. Izvestkovye skarny v srednerifeiskikh otlozheniyakh Aktashskoi ploschadi (Yuzhnyi Ural) [Calcareous skarns in the Middle

- Riphean deposits of the Aktash area (Southern Urals)]. *Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i soprodel'nykh territorii*: sb. st. 13-oj mezhterritorial'noj nauchno-prakticheskoy konferencii. [Geology, minerals and problems of geoecology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories], Ufa: Mir pechati Publ., 2020, pp. 94–106. (In Russ.)
24. Kozlov V.I., Puchkov V.N., Sergeeva N.D. Novaya skhema raschleneniya razreza parametricheskoi skvazhiny 1 Kulguninskaya (Yuzhnyi Ural) [A new scheme for subdividing the section of the parametric well 1 Kulguninskaya (Southern Urals)]. Ufa, DizainPoligrafServis publ., 2011, 60 p. (In Russ.)
25. Chang Y.A., Goldberg D., Neumann J.P. Phase diagrams and thermodynamic properties of ternary gold-copper-silver systems. *J. Phys. Chem. Reference Data*, 1977, vol. 6, pp. 621–669.
26. Murzin V.V., Malyugin A.A. Novye dannye o nestabil'nosti prirodnykh tverdykh rastvorov sistemy Au–Ag–Cu v oblasti temperatur mence 350°S [New data on the instability of natural solid solutions of the Au–Ag–Cu system at temperatures below 350°C]. *Doklady AN SSSR*, 1983, vol. 269, no 3, pp. 723–724. (In Russ.)
27. Knight J., Leitch C.H.B. Phase relations in the system Au–Cu–Ag at low temperatures based on natural assemblages // *The Canadian Mineralogist*. 2001. vol. 39. pp. 889–905.
28. Murzin V.V., Palyanova G.A., Varlamov D.A., Shanina S.N. Zolotonosnye rodingity Agardagskogo massiva giperbazitov (Ju. Tuva, Rossiya) i problemy ih genezisa [Gold-bearing rodingites of the Agardag ultramafic massif (South Tuva, Russia) and problems of their genesis]. *Geology of ore deposits*, 2020, vol. 62, no 3, pp. 204–224.
29. Okamoto H., Chakrabarti D.J., Laughlin D.E., Massalski T.B. The Au-Cu (goldcopper) system. *Bull. Alloy Phase Diagrams*, 1987, vol. 8, pp. 453–474.
30. Ray G.E. A review of skarns in the Canadian Cordillera. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Open File 2013-08, 2013, 50 p.
31. Xie G., Mao J., Richards J.P., Han Y., Fu B. Distal Au Deposits Associated with Cu-Au Skarn Mineralization in the Fengshan Area, Eastern China. *Economic Geology*, 2019, vol. 114, no 1, pp. 127–142.
32. Sint N.N., Yonezu K., Tindell T., Aye M.T., Win H., Imai A., Watanabe K. Geology and Skarn Cu–Bi–Au Mineralization at Shwe Min Bon Area, Kalaw Township, Southern Shan State, Myanmar. *Resource Geology*, 2019, vol. 69, no 1, pp. 85–106.
33. Drits M.E., Bochvar N.R., Guzei L.S., Lysova E.V. Dvoynye i mnogokomponentnye splavy na osnove medi [Binary and multicomponent alloys based on copper]. Moscow, Nauka publ., 1979, 248 p. (In Russ.)
34. Gaskov I.V., Borisenko A.S., Babich V.V., Naumov E.A. The stages and duration of formation of gold mineralization at copper-skarn deposits (Altai-Sayan folded area). *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no 10, pp. 1091–1101. DOI: 10.1016/j.rgg.2010.09.001
35. Dzwillo R. Anwendbarkeit microthermometrischer untersuchungen an sediment-hosted lagerstten aus dem proterozoicum des Westurals. Diplomarbeit. Free Universitet Berlin. Institut fur Geologie. Berlin, 2000, 56 p.

*Michurin Sergey Vasil'evich* – к. г.-м. н., Институт геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, Российская Федерация; e-mail: s\_michurin@mail.ru; ORCID 0000-0002-2776-2190

*Sharipova Aysylu Azatovna* – к. г.-м. н., Институт геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, Российская Федерация; e-mail: aysyluazatovna@mail.ru; ORCID 0000-0001-5339-9316

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Sergey V. Michurin* – PhD in Geol-Min., Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; e-mail: s\_michurin@mail.ru; ORCID 0000-0002-2776-2190

*Aisylu A. Sharipova* – PhD in Geol-Min., Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; e-mail: aysyluazatovna@mail.ru; ORCID 0000-0001-5339-9316

*All authors have read and approved the final manuscript.*