

***Минералого-геохимические особенности «горячих камней»
на примере россыпного месторождения Хлебопёк
(Бодайбинский район Иркутской области)***

©2025 В. А. Лукьяненко^{1,2}, А. А. Мальцев², Д. А. Мандрыгина³,
Т. Н. Полякова⁴✉, А. А. Дубков⁵, Ю. А. Кузнецов¹

¹ООО «РГ Иркутскгеофизика - 3», ул. Клары Цеткин,
д. 9а, 664039, г. Иркутск, Российская Федерация

²Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН,
ул. Косыгина, д. 4, 119334, г. Москва, Российская Федерация

³Институту геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского,
стр. 15, 620110, г. Екатеринбург, Российская Федерация

⁴Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация

⁵ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной
институт», ш. Энтузиастов, д. 36, 105118, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение: «Горячие камни», в большом количестве фиксируемые в отвалах россыпных месторождений после промывки золота на промприборах с помощью металлодетекторов, являются помехой для искателей самородков, так как не содержат «видимого» золота. Однако их изучение представляет значительный интерес как с научной, так и с практической точки зрения, расширяя познания о геохимии золота, процессах его концентрации в россыпях, возможных поисковых критериях коренных и россыпных золоторудных месторождений.

Методика: исследования минералого-геохимических особенностей «горячих камней» россыпного месторождения Хлебопёк выполнены методами оптической и электронной микроскопии, атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-OES) и рентгенофазового анализа.

Результаты и обсуждение: «Горячие камни» неоднородны по удельному весу, элементному и минеральному составу при одинаковых сигналах детекторов, настроенных на золото. Сигнал от «горячих камней» возникает из-за наличия в них магнитовосприимчивых и токопроводящих минералов, взаимодействующих с электромагнитным полем катушки. Их совместное действие формирует сложную структуру из проводников, магнитовосприимчивых минералов и пьезоэлектриков. В «горячих камнях» содержатся минеральные формы золота и серебра, в которых благородные элементы находятся не только в нуль валентной, но в окисленной форме в виде теллуридов, стибнитов и т.п. Связь «горячих камней» с микро- и наночастицами золота соответствует схеме электрической преципитации. Уникальной особенностью «горячих камней» является и очень высокое содержание минералов никеля.

Выводы: представление о минеральном составе «горячих камней» как об образованиях, состоящих преимущественно из магнитных минералов железа, ошибочно. Их минеральный состав значительно



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Полякова Татьяна Николаевна, e-mail: imgre2010@yandex.ru

разнообразнее. «Горячие камни», в которых благородные элементы находятся в окисленных формах и имеют микро- и наноразмеры, и есть тот источник, который начинает формировать «ноль валентное золото», как только эти образования попадают в зону гипергенеза. Золотоносные пирит-пирротиновые руды и связанные с ними магнитные аномалии, которые легко обнаруживаются методами магниторазведки с БПЛА, могут служить районными поисковыми критериями при проведении геологоразведочных работ на рудное и россыпное золото.

Ключевые слова: «горячие камни», удельный вес, минеральный состав, золото, микро- и наноразмеры.

Для цитирования: Лукьяненко В. А., Мальцев А. А., Мандрыгина Д. А., Полякова Т. Н., Дубков А. А., Кузнецов Ю. А. Минералого-геохимические особенности «горячих камней» на примере россыпного месторождения Хлебопёк (Бодайбинский район Иркутской области) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2025. № 2. С. 32–42. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/2/32-42>

Введение

«Горячие камни» – это ненаучный термин, который часто употребляется во всём мире при поиске золотых самородков с помощью металлоискателей. Он используется для описания определённого типа горных пород или минеральных образований, которые из-за своего состава способны вызывать ложные сигналы устройств детекторов металлоискателей. Различные типы и марки металлодетекторов работают на основе принципа электромагнитной индукции и могут обнаруживать токопроводящие объекты на незначительных глубинах. Физические принципы работы металлоискателей основываются на том, что металлоискатель генерирует электромагнитное поле, проникающее в землю. Когда электромагнитные волны встречают металлический объект (проводник), они создают вторичное поле, которое фиксируется приемником металлоискателя, и его сигнальные системы (детекторы) сообщают о наличии токопроводящего объекта. Такой метод считается самым простым и быстрым способом для поиска самородков, находящихся на незначительной глубине под землёй или, например, в гале-эфельных отвалах, и требует минимальных знаний минералогии и геологии для исполнителя.

Однако при поисках самородков на детекторы приходят чаще всего не сигналы от самородков, а куда более многочисленные ложные отклики. На отработанных полигонах и гале-эфельных отвалах это связано не только со значительным количеством магнитных и токопроводящих техногенных отходов, но и со значительным количеством так называемых «горячих камней».

Предполагается, что «горячие камни» содержат большое количество минералов железа или другие проводящие ток минеральные фазы, которые могут реагировать на магнитное поле или электромагнитное излучение, создаваемое металлоискателем (например, магнетит, пирит, пирротин и другие). Считается, что их при должном умении и навыке можно отделить от сигналов самородков. «Горячие камни», как правило, являются помехой для искателей самородков, так как не содержат «видимого» золота. Однако их изучение представляет значительный интерес как с научной, так и с практической точки зрения, расширяя познания о геохимии золота, процессах его концентрации в россыпях, возможных поисковых критериях коренных и

россыпных золоторудных месторождений.

В статье приведены результаты изучения минералого-геохимических особенностей группы пород, называемых «горячими камнями», которые в большом количестве фиксируются в гале-эфельных отвалах россыпного месторождения Хлебопёк.

Россыпное месторождение золота Хлебопек расположено в долине одноимённого ручья, в Бодайбинском районе Иркутской области России. Геологическое строение Бодайбинского района детально исследовано и описано в многочисленных геологических источниках [1–5 и др.]. Геологические особенности россыпного месторождения Хлебопёк также широко освещены в литературе [6, 7].

Объекты и методы исследований

Образцы «горячих камней» отобраны из гале-эфельных отвалов при поиске металлоискателями моделей Tesoro Lobo Super Traq, Garrett ACE 400i, XP ORX и другими. Диагностика рудных минералов и анализ их микроскопических особенностей выполнены методом оптической микроскопии в отраженном свете (микроскоп Altami). Локальные анализы минералов проведены на электронных микроскопах Jeol 6380LVc системой количественного энергодисперсионного анализа «Inca» и «HitachiTM-1000». Изучение минерального состава «горячих камней» осуществлялось на рентгенофазовых дифрактометрах «ARLX'tra» (Швейцария), «Rigaku» (Япония) и «Powdix600» (Белоруссия). Геохимическая характеристика пород приводится по результатам анализа методом атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-OES).

Результаты исследований

В составе аллювиальных и делювиальных отложений, из которых промывается золото р. Хлебопек, преобладают обломки кристаллических сланцев бодайбинской серии рифей-вендского возраста. Форма «горячих камней», отобранных из гале-эфельных отвалов сразу после промывки породы на промприборе, окатанная, размер варьирует от 2 до 10 см. Текстура пород массивная, структура сланцеватая, типичная для метаморфических пород (рис. 1). Местами на поверхности присутствуют гнёзда «ожелезнения». На свежем сколе видно, что основная масса породы визуально

воспринимается как сульфидно-медно-никелевая руда, состоящая на 90 % и более из рудных минералов. Основная масса породы на сколах серебристо кремового цвета, часто с жёлтым оттенком, имеет металлический блеск, обладает повышенным удельным весом и магнитной восприимчивостью.



Рис. 1. Свежий скол образца «горячего камня».

[Fig. 1. Fresh chip of the «hot stone» sample.]

По магнитной восприимчивости образцы «горячих камней» были разделены на три условные группы: слабомагнитные, среднемагнитные и сильномагнитные. Сравнение их удельных весов (табл. 1) показало, что «горячие камни» с меньшим удельным весом имеют меньшую магнитную восприимчивость. Это позволяет предположить, что рост удельного веса «горячих камней» связан с увеличением содержания в них существующей в природе относительно небольшой группы магнитных минералов (магнетит, аваруит, пентландит, пирротин).

При детальном исследовании зависимости химического состава «горячих камней» от их удельного веса установлено, что с ростом удельного веса в породах повышается не только содержание железа, но и никеля (до 13.5 % при промышленном значении в 1–2 %), а также кобальта (табл. 2). Из других полезных компонентов обращает на себя внимание высокое содержание меди, рения и, в образцах с удельным весом более 4-х, серебра. Для этих проб определение других благородных элементов и теллура не проводилось, так как не предполагалось их наличие в «горячих камнях».

Табл. 1. Связь магнитной восприимчивости «горячих камней» с их удельным весом
[Table 1. Relationship between magnetic susceptibility of «hot stones» and their specific gravity]

№ обр. [№ of sample]	Вес сухой породы, г [Dry rock weight]	Вес в воде, г [Weight in water]	Удельный вес, г/см ³ [Specific gravity]
Слабомагнитные [Weakly magnetic]			
a	65.5	44.6	3.1
b	17.5	12.3	3.4
c	32.3	24.8	4.3
d	99.8	66.3	3.0
e	76.5	51.8	3.1
f	33.0	22.9	3.3
g	26.0	20.2	4.5
Среднее значение [Average value]			3.5
Среднемагнитные [Medium-magnetic]			
h	23.8	16.7	3.4
i	71.5	55.5	4.5
j	54.8	37.3	3.1
k	35.3	23.9	3.1
l	50.4	39.4	4.6
m	47.7	36.1	4.1
n	53.0	40.6	4.3
o	30.0	21.4	3.5
p	72.3	48.8	3.1
Среднее значение [Average value]			3.7
Сильномагнитные [Highly magnetic]			
q	72.1	55.4	4.3
r	32.8	25.0	4.2
s	73.2	54.7	4.0
t	44.3	34.3	4.4
u	47.2	36.6	4.5
v	63.3	49.6	4.6
w	51.0	39.8	4.5
x	130.6	88.8	3.1
y	98.8	71.3	3.6
z	62.9	48.2	4.3
Среднее значение [Average value]			4.2
Пентландит [Pentlandite]			4.5 – 5
Пирротин [Pyrrhotite]			4.58 – 4.70
Магнетит [Magnetite]			4.9 – 5.2
Аваруит [Awaruite]			7.8 – 8.6

Табл. 2. Зависимость химического состава «горячих камней» от удельного веса породы
[Table 2. Dependence of the chemical composition of «hot stones» on specific gravity]

Удельный вес 3.0 [Specific gravity 3.0]		Удельный вес 3.5 [Specific gravity 3.5]		Удельный вес 4.0 [Specific gravity 4.0]		Удельный вес 4.5 [Specific gravity 4.5]	
El	m/m%	El	m/m%	El	m/m%	El	m/m%
Si	17.41	Fe	18.9	S	18.38	Fe	28.81
Mg	12.84	Si	10.77	Fe	21.41	S	8.47
Fe	12.24	Mg	10.92	Cu	9.66	Ni	13.57
Al	3.15	S	6.26	Ni	3.62	Na	6.4
S	2	Cu	3.47	Na	2.51	Cu	4.15
Ca	3.24	Al	1.73	Si	0.731	Mg	1.46
Na	2	Ca	2.2	Mg	0.686	Si	1.05
K	1.92	Ni	1.97	Al	0.157	P	0.337
Ni	0.922	Na	1.11	Co	0.0741	Al	0.27
Ti	0.577	Ti	0.404	P	0.0408	Co	0.244
Cu	0.571	K	0.329	K	0.0379	K	0.0483
P	0.121	P	0.0756	Ca	0.0245	Mo	0.0311
Mn	0.151	Mn	0.0822	Zn	0.023	Ca	0.0209
V	0.0279	Co	0.0492	Ti	0.0158	Mn	0.0202
Co	0.0321	V	0.0194	Cs	0.0104	Se	0.0174
Cl	0.0279	Cl	0.0305	Mn	0.0075	Rh	0.0152
Zn	0.0151	Zn	0.0149	Se	0.0067	Re	0.0113
Ba	0.0136	Cs	0.0085	Mo	0.0062	Zn	0.0104
Re	0.0046	Re	0.0055	Ag	0.0087	Ag	0.0114
Cs	0.0046	Pb	0.0029	Cd	0.0049	Cd	0.0105
Ge	0.0015	Se	0.0019	Re	0.0038	Cs	0.0086
				V	0.0027	V	0.0043
Tl	0.0001	Tl	0.0002			Tl	0.00096
				Pb	0.0001	Pb	0.0012

Высокие содержания никеля, железа и меди были подтверждены результатами анализа методом атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-AES) в валовой пробе с удельным весом более 4.0 г/см³. Среднее содержание никеля в породах составило 8.3 %, железа – 40.2 %, меди – 2.4 %.

Изучение минерального состава «горячих камней» на первом этапе исследований осуществлялось при помощи рентгенофазового анализа.

Из таблицы 3 видно, что основными породообразующими минералами в изученных образцах явля-

ются пирротин, пентландит, халькопирит и, лишь отчасти, магнетит (оксид железа (III)), которые, за исключением халькопирита, проявляют ярко выраженные ферромагнитные свойства, а также легко встраивают в свою кристаллическую решётку атомы металлов, имеющих схожие и даже превышающие их размер [8–13]. Были отмечены интерметаллические природные сплавы железа и никеля – аварунит (NiFe), олова и никеля (Nickel tin), а также «самородный» никель.

Табл. 3. Фазовый состав «тяжелых горячих камней» (удельный вес 4.2–4.5 г/см³)
[Table 3. Phase composition of «heavy hot stones» (specific gravity 4.2–4.5 g/cm³)]

Образец 1А [Sample 1A]		Образец 2А [Sample 2A]		Образец 3А [Sample 3A]	
1	2	3	4	5	6
Phase	Weight (%)	Phase	Weight (%)	Phase	Weight (%)
Chalcopyrite	48.3	Pyrrhotite	42.2	Pyrrhotite	36.2
Pyrrhotite	36.1	Pentlandite	21.1	Pentlandite	21.2
Pentlandite	10.9	Chalcopyrite	19.2	Chalcopyrite	19.1
Magnetite	1.2	Magnetite	3.9	Magnetite	5.3
Awaruite	1.1	Quartz	3.1	Gold silver telluride	3.4
Gersdorffite	0.6	Nickel disulphide	2.1	Quartz	3.2
Au ₃ Cu	0.5	Silvanite	1.6	Covellin	2.7
Gold silver telluride	0.4	Millerite	1.1	Nickel disulphide	2.6

Продолжение табл. 3
[Continued Table 3]

1	2	3	4	5	6
Nickel tin	0.4	Nickel tin	1	Silver bromide	1.3
Nickel	0.4	Gold silver telluride	0.9	Nickel tin	1
Nickel arsenide	0.3	Nickel antimonide	0.9	Silver iodide HP	0.7
Tetradimite	0.3	Ag	0.7	Nickel ditelluride	0.6
Galena	0.2	Gersdorffite	0.7	Hessite	0.5
Sphalerite	0.2	Nickel oxide	0.6	Nickel antimonide	0.5
Hessite	0.1	Au ₃ Cu	0.3	Tetradimite	0.4
		Galena	0.3	Ag	0.4
		Altaite	0.2	Nickel oxide	0.4
		Hessite	0.1	Altaite	0.3
				Rucklidgeite	0.2
				Tetradimite	0.2

Необходимо отметить, что, по крайней мере, пирротин, аварунт, никель, никелистое олово, теллуриды золота и серебра и само золото являются проводниками. Так же из таблицы видно, что в исследованных образцах содержится большое разнообразие минеральных фаз Au и Ag. Благородные элементы почти всегда имеют различную степень окисления, за исключением иногда определяемых Au₃Cu и Ag, имеющих нулевую степень окисления. Основные минеральные формы золота и серебра, а также свинца и висмута, представлены их теллуридами. Из нерудных минералов в «горячих камнях» почти всегда отмечается, чаще всего в незначительных количествах, кварц.

Данные рентгенофазового анализа хорошо подтверждаются результатами оптических и электронно-микроскопических исследований аншлифов «горячих камней», сделанных из тех же образцов (рис. 2–4, табл. 4).

Как известно [14–16], теллуриды благородных элементов являются минеральными формами, степень окисления которых всегда отлична от нуля. В зоне гипергенеза они «охотнее», чем «ноль валентные» формы благородных элементов, участвуют в природных химических реакциях, легко переходя в растворимые формы. В дальнейшем они могут осаждаться на зародышевых частицах золота, серебра или никеля в процессе их восстановления из растворов, образующихся при разрушении сульфитов, которые всегда формируются в зоне гипергенеза при разложении сульфидов.

В крупных, массивных кусках «горячих камней» такой процесс образования крупных «ноль валентных» форм золота и серебра из их теллуридов, находящихся в породе в виде микро- и наночастиц, затруднен, а вот в мелких кусках, на окисленных поверхностях он вполне возможен (рис. 5–6).

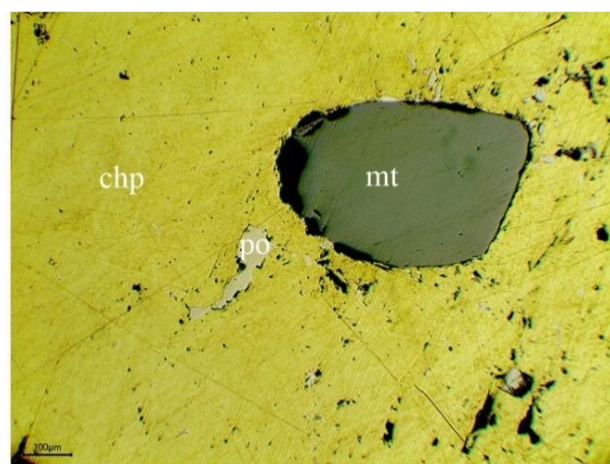
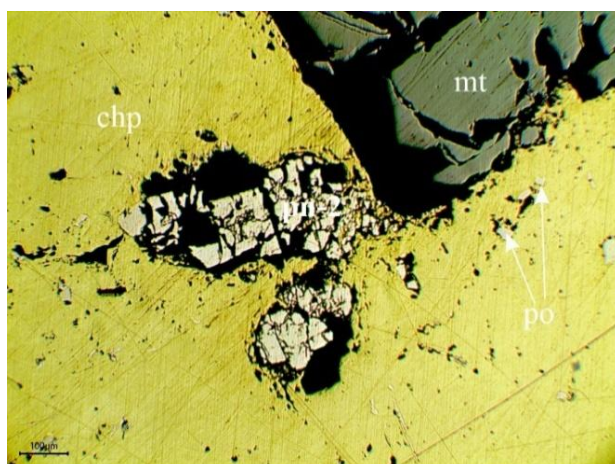


Рис. 2. Взаимоотношения магнетита, пирротина, пентландита и халькопирита в халькопиритовой матрице. Аншлиф. Обр. 2А. Фото в отраженном свете.

[Fig. 2. Relationships between magnetite, pyrrhotite, pentlandite, and chalcopyrite in a chalcopyrite matrix. Thin section. Sample 2A. Photomicrograph in reflected light.]

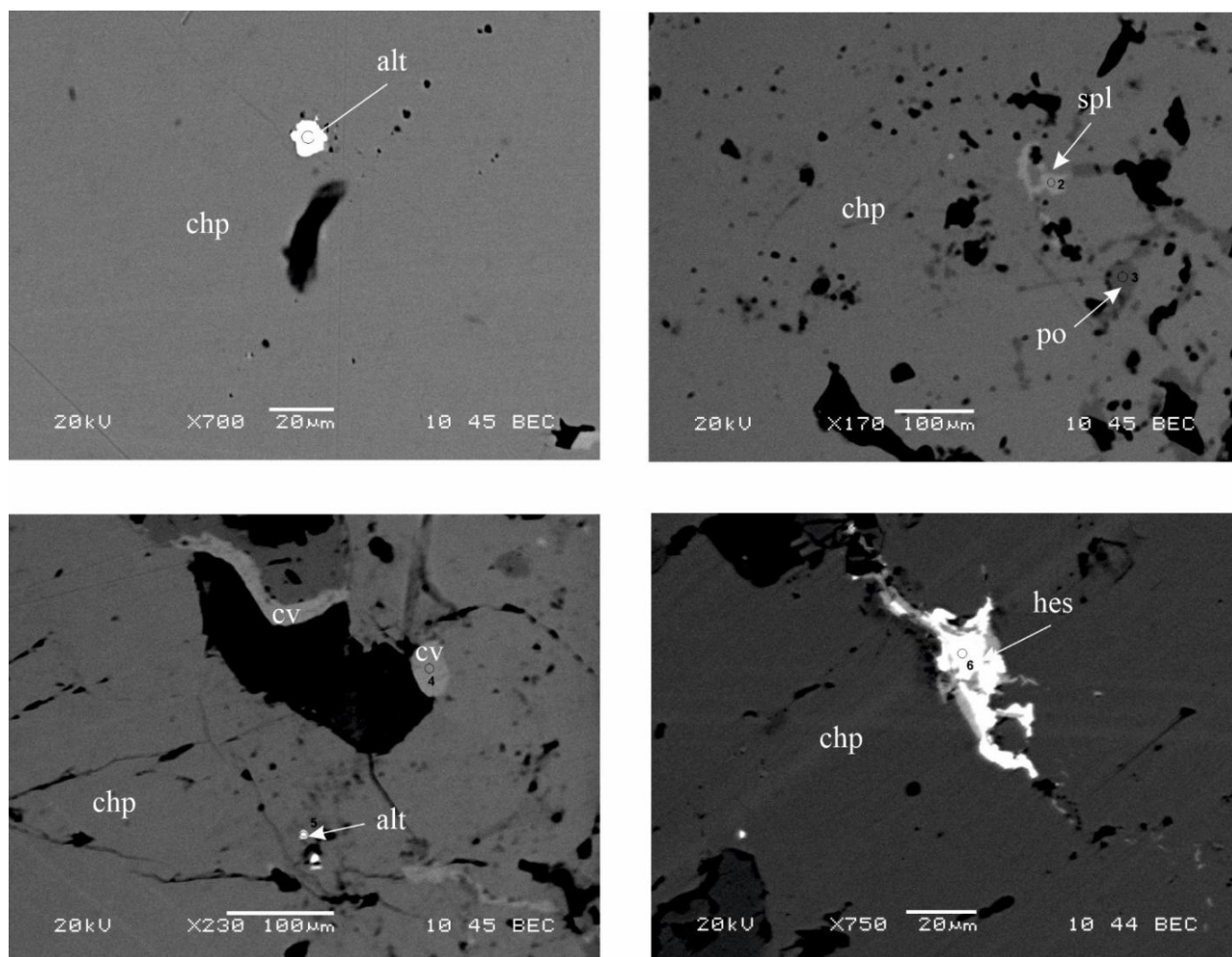


Рис. 3. Теллуриды свинца (алтаит) и серебра (гессит) в халькопиритовой матрице «тяжелых горячих камней». Аншлиф. Обр. 2А. Фото в отраженных электронах.

[Fig. 3. Lead telluride (altaite) and silver telluride (hessite) in a chalcopyrite matrix of «heavy hot stones». Thin section. Sample 2A. Photomicrograph in reflected electrons.]

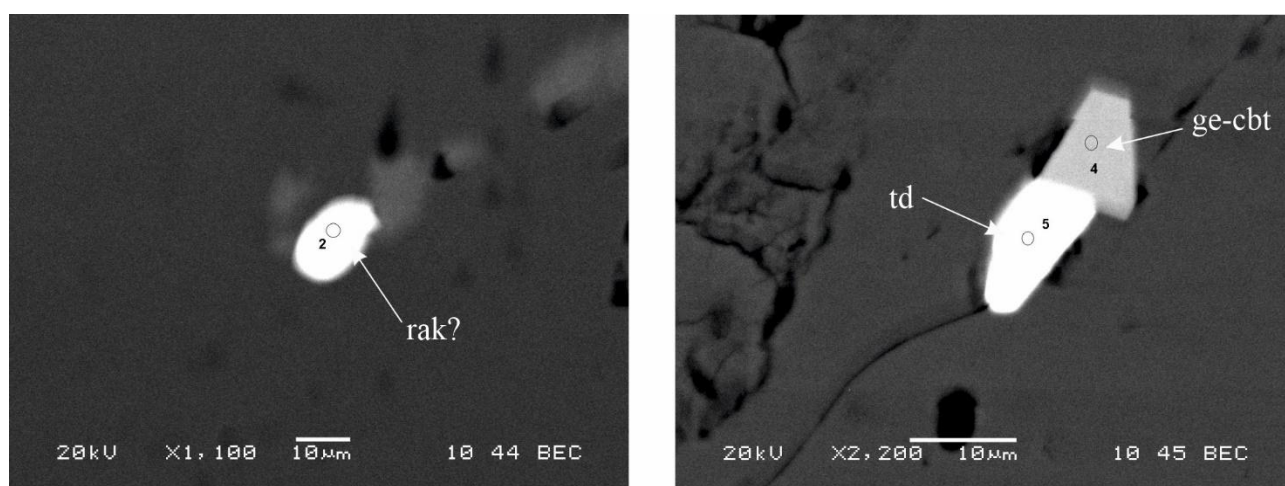


Рис. 4. Теллуриды висмута, свинца (раклиджит), висмута (тетрадимит) и кобальтистый герсдорфит в халькопирит-пентландит-пирротиновой основной массе «тяжелых горячих камней». Аншлиф. Обр. 3А. Фото в отраженных электронах.

[Fig. 4. Bismuth tellurides, lead telluride (rucklidgeite), bismuth telluride (tetradymite), and cobaltian gersdorffite in a chalcopyrite-pentlandite-pyrrhotite groundmass of «heavy hot stones». Thin section. Sample 3A. Photomicrograph in reflected electrons.]

Табл. 4. Химический состав минералов в «тяжелых горячих камнях» (удельный вес 4.2–4.5 г/см³) (масс. %) [Table 4. Chemical composition of minerals in «heavy hot stones» (specific gravity 4.2–4.5 g/cm³) (wt. %)]

Химический элемент [Chemical element]	Обр. 2А [Sample 2A]			Обр. 3А [Sample 3A]		
	Алтаит [Altaite] (PbTe)		Гессит [Hessite] (Ag ₂ Te)	Раклиджит? [Rucklidgeite] ((Bi, Pb) ₃ Te ₄)	Тетрадимит [Tetradymite] (Bi ₂ Te ₂ S)	Кобальтистый герсдорфит [Cobaltian hersdorffite] ((Co, Ni)AsS)
	Точки анализов [Data points]			Точки анализов [Data points]		
	1	5	6	2	5	4
S	-	-	-	-	3.49	18.64
Fe	1.32	-	-	-	2.57	4.76
Ni	-	-	-	-	-	22.27
Se	-	-	-	3.36	2.22	-
Te	39.15	37.0	37.64	30.48	34.19	-
Pb	58.12	48.56	-	14.26	-	-
Bi	-	-	-	51.90	57.78	-
Co	-	-	-	-	-	8.91
As	-	-	-	-	-	46.93
Ag	-	14.44	62.35	-	-	-
Сумма	98.58	100.0	100.0	100.0	100.26	101.51

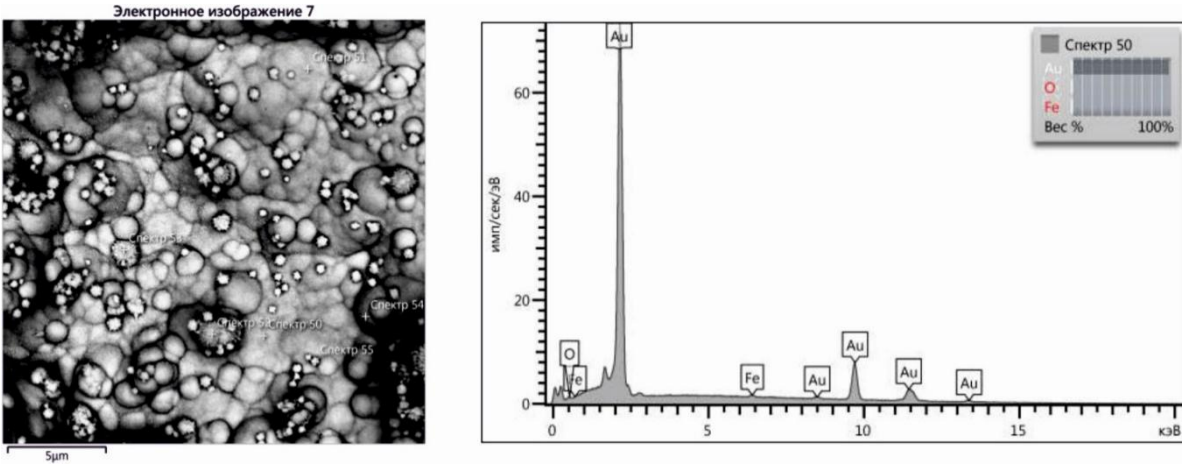


Рис. 5. Нешлифованный образец 1А. «Толстая» плёнка золота, практически не пробиваемая лучом электронного микроскопа на поверхности пирротина. Спектр приведён только для 50-й точки исследований. [Fig. 5. Unpolished sample 1A. A «thick» gold film that is practically impervious to the electron microscope beam on the surface of pyrrhotite. The spectrum is given only for the 50th point of the study.]

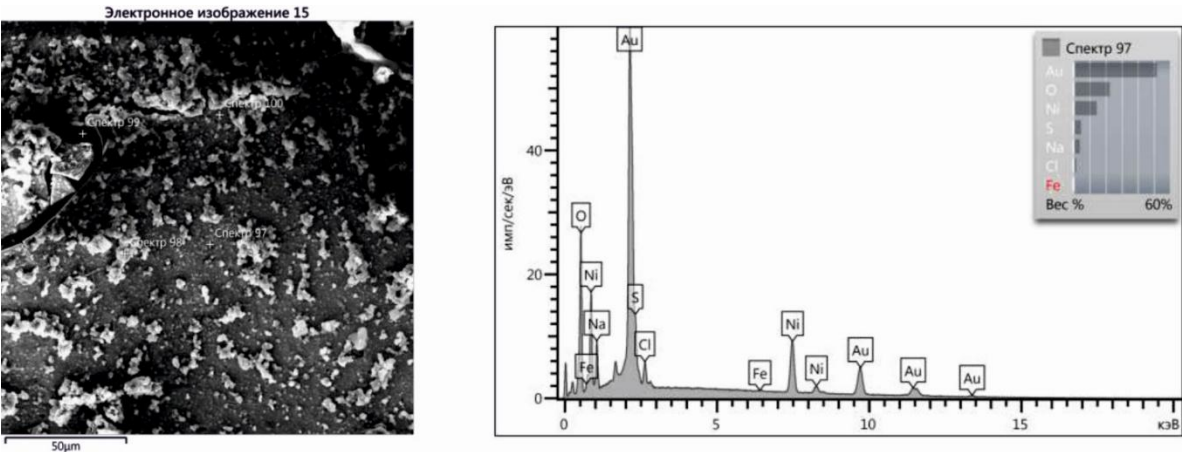


Рис. 6. Нешлифованный образец 2А. «Фрагментарная» плёнка золота на поверхности пентландита. Спектр приведён только для 97-й точки исследований. [Fig. 6. Unpolished sample 2A. «Fragmentary» gold film on the surface of pentlandite. The spectrum is given only for the 97th research point.]

Обсуждение полученных результатов

В ходе исследований состава «горячих камней» было установлено:

1) «горячие камни» неоднородны по своему элементному и минеральному составу;

2) они разделяются на группы по своему удельному весу и минеральному составу при абсолютно схожих характеристиках сигналов детекторов, настроенных на фиксацию сигнала именно от самородков золота;

3) появление сигнала может быть обусловлено присутствием в «горячих камнях» как магнитовосприимчивых, так и токопроводящих минералов, которые реагируют на изменения параметров электромагнитного поля, создаваемого движением катушки. Скорее всего, это результат их совместного взаимодействия, при котором «недостаток» магнитовосприимчивых минералов компенсируется «избытком» электропроводящих, формируя сложную пространственную структуру, состоящую из проводников, магнитовосприимчивых минералов и пьезоэлектриков.

4) установленная парагенетическая связь «горячих камней» с микро- и наноформами, по крайней мере, золота полностью укладывается в схему электрической преципитации, описанной нами ранее [17, 18].

Выводы

1. Существующее представление о минеральном составе «горячих камней» как об образованиях, состоящих преимущественно из магнитных минералов железа, которые мешают поиску самородков, является ошибочным. Их минеральный состав гораздо более разнообразен.

2. Полученные данные позволяют утверждать, что «горячие камни», в которых благородные элементы находятся в окисленных формах и имеют микро- и наноразмеры, и есть тот источник, который начинает формировать «ноль валентное золото», как только эти образования попадают в зону гипергенеза.

3. Микро- и наноразмерные частицы благородных элементов, даже в значительных количествах рассеянные в массе «горячих камней», не представляют интереса для поисковых работ с использованием металлодетекторов. Они также не имеют особой ценности для кустарной добычи из магнитной фракции тяжёлого шлиха.

4. Пирит-пирротиновые руды, содержащие золото, и связанные с ними магнитные аномалии могут быть легко обнаружены современными методами магниторазведки с использованием БПЛА. Принимая во внимание большое количество обломков пирит-пирротиновых руд в гале-эфельных отвалах россыпного месторождения Хлебопёк, мы считаем, что обусловленные ими магнитные аномалии могут служить районными поисковыми критериями при проведении геологоразведочных работ на рудное и россыпное золото.

5. Причины аномально высокого содержания никеля в различных минеральных формах в «горячих камнях», а тем более его возможный источник, оста-

ются невыясненными. Однако значительно повышенные концентрации никеля в любых группах «горячих камней», по крайней мере в Бодайбинском районе, плохо согласуются с гипотезой о коровом происхождении таких никелевых руд. При этом наличие более глубоких источников никеля для этого, казалось бы, хорошо изученного района ранее не предполагалось.

Благодарности: работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» Института биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН и Центра коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Онищенко С. А., Сокерина Н. В. Особенности формирования золоторудного черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // *Геология рудных месторождений*, 2021, Т. 63, № 2, стр. 154–173.
2. Тарасова Ю. И., Будяк А. Е., Иванов А. В., Горячев Н. А., Игнатъев А. В., Веливецкая Т. А., Радомская Т. А., Блинов А. В., Бабяк В. Н. Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // *Записки Российской Минералогического Общества*. 2021. Т. 150. № 1. С. 63–75.
3. Конкин В. Д., Иванов А. И., Котельников Е. Е., Васюков Е. Е., Захаров И. О. К методике оценки прогнозных ресурсов золота в углеродистых карбонатно-терригенных отложениях Бодайбинского рудного района // *Отечественная геология*. 2017. № 4. С. 64–80.
4. Таусон В. Л., Немеров В. К., Развозжаева Э. А., Спиридонов А. М., Липко С. В., Будяк А. Е. Парагенетические отношения пирита, углерода и золота на месторождении Сухой Лог и типоморфизм поверхности пирита // *ДАН*. 2009. Т. 426. № 4. С. 529–532.
5. Иванов А. И., Агеев Ю. М. Закономерности формирования золоторудных месторождений золота Бодайбинского рудного района // *Известия Сибирского отделения, секции наук о Земле*. Иркутск. 2005. Вып. 2. С. 37–49.
6. Кузнецов Ю. А., Грибанов В. П., Варфоломеев С. Д., Калинин В. Н., Мальцев А. А., Дубков А. А., Гулин А. А., Жабин А. В. Минералого-геохимические особенности состава «плавущего золота» на примере золоторудного месторождения Хлебопёк (Бодайбинский район, Иркутская область) // *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2024. Вып. 113. С. 16–29.
7. Кузнецов Ю. А., Грибанов В. П., Варфоломеев С. Д., Калинин В. Н., Дубков А. А., Гулин А. А., Жабин А. В. Исследования изменений минерального состава пород в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» на примере притоков золоторудного месторождения Хлебопёк (Бодайбинский район, Иркутская область) // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Геология. 2024. № 1. С. 32–48.
8. Onufrienok V. V., Zvegintsev A. G. Possible Types of Ordering Cation Vacancies in Structures of the NiAs Type // *J. Inorganic materials*. 1982. Vol. 18(3). P. 301–304.
9. Машуков А. В., Онуфриенко В. В. Физические свойства минералов, индуцированные точечными дефектами.

Красноярск: СФУ, 2007. 224 с.

10. Онуфриенко В. В. Фазовые соотношения сульфидов железа в метастабильном состоянии // *Физика твердого тела*. 1991. Т. 33. № 7. С. 2213–2215.
11. Сазонов А. М., Онуфриенко В. В., Колмаков Ю. В., Некрасова Н. А. Пирротин золотосодержащих руд: состав, точечные дефекты, магнитные свойства, распределение золота // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии»*. 2014. № 6 (7). С. 717–737.
12. Писакин Б. Н. Идентификационные признаки пирротина как катионодефицитного минерала // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2004. Сер. 7. Вып. 1. С. 3–13.
13. Пальянова Г. А., Сазонов А. М., Журавкова Т. В., Сильянов С. А. Состав пирротина как индикатор условий минералообразования на золоторудном месторождении Советское (Енисейский Кряж, Россия) // *Геология и геофизика*. 2019. № 7. С. 934–954.
14. Streltsov S. V., Roizen V. V., Ushakov A. V., Oganov A. R., Khomskii D. I. Old puzzle of incommensurate crystal structure of

calaverite AuTe₂ and predicted stability of novel AuTe compound // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2018. Vol. 115. No. 40. P. 9945–9950

15. Dam B., Janner A. Incommensurate Morphology of Calaverite (AuTe₂) Crystals // *Physical Review Letters* 1985. Vol. 55. No. 21. P. 2301–2304.
16. Kudo K., Ishii H., Takasuga M., Iba K., Nakano S., Kim J., Fujiwara A., Nohara M. Superconductivity Induced by Breaking Te₂ Dimers of AuTe₂ // *The Physical Society of Japan*. 2013. Vol. 82. 063704.
17. Варфоломеев С. Д., Калинин В. Н., Кузнецов Ю. А., Жабин А. В., Гачок И. В., Цыбенкова С. Б. Математическая модель генезиса россыпного золота // *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2024. Вып. 114. С. 58–70.
18. Varfolomeev S. D., Kalynychenko V. N., Kuznetsov Yu. A., Gachokb I. V., and Tsybenova S. B. Physicochemical Model of the Formation of Alluvial Gold // *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2024. Vol. 98 No. 12. P. 2798–2809.

Лукьяненко Валентина Алексеевна, инженер-исследователь, ООО «РГ Иркутскгеофизика-3», Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, Иркутск, Москва, Российская Федерация; e-mail: lukyanenko_v02@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0009-0008-0858-4721>

Кузнецов Юрий Александрович, ген. директор, ООО «РГ Иркутскгеофизика-3», Иркутск, Российская Федерация; e-mail: tundra49@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1162-1024>

Мальцев Александр Андреевич, к.х.н., н.с., Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: aam.0205@yandex.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5378-174X>

Мандрыгина Дарья Александровна, инженер-исследователь, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: roxyschnoda@gmail.com; ORCID <https://orcid.org/0009-0009-5061-2981>

Полякова Татьяна Николаевна, к.г.-м.н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: imgre2010@yandex.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9957-9002>

Дубков Александр Алексеевич, инженер-исследователь, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт», Москва, Российская Федерация; e-mail: dubston@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1871-9713>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Valentina A. Lukyanenko, Research Engineer, RG Irkutskgeofizika-3 LLC, N. M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Moscow, Russian Federation; e-mail: lukyanenko_v02@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0009-0008-0858-4721>

Yuri A. Kuznetsov, General Director, RG Irkutskgeofizika-3 LLC, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: tundra49@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1162-1024>

Alexander A. Maltsev, PhD in Chemistry, Research Scientist, N. M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: aam.0205@yandex.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5378-174X>

Daria A. Mandrygina, Research Engineer, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; e-mail: roxyschnoda@gmail.com; ORCID <https://orcid.org/0009-0009-5061-2981>

Tatyana N. Polyakova, PhD in Geol.-Min., Associate professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: imgre2010@yandex.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9957-9002>

Alexander A. Dubkov, Research Engineer, All-Russian Research Geological Oil Institute (VNIGNI), Moscow, Russian Federation; e-mail: dubston@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1871-9713>

All authors have read and approved the final manuscript.

***Mineralogical and geochemical features of «Hot stones»
based on the example of the Khlebopek placer deposit
(Bodaybinsky district, Irkutsk oblast, Russia)***

©2025 V. A. Lukyanenko^{1,2}, A. A. Maltsev², D. A. Mandrygina³,
T. N. Polyakova⁴✉, A. A. Dubkov⁵, Yu. A. Kuznetsov¹

¹*RG Irkutskgeofizika-3 LLC, 9a Klara Tsetkin st., 664039, Irkutsk, Russian Federation*

²*N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences,*

⁴Kosygina st., 119334, Moscow, Russian Federation

³*Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
15 Akademika Vonsovskogo st., 620110, Yekaterinburg, Russian Federation*

⁴*Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394018, Voronezh, Russian Federation*

⁵*All-Russian Research Geological Oil Institute (VNIGNI),
36 Entuziastov Highway, 105118, Moscow, Russian Federation*

Abstract

Introduction: «Hot stones», frequently detected in the waste dumps of placer deposits after gold washing using metal detectors, are a nuisance for prospectors seeking nuggets, as they do not contain «visible» gold. However, their study is of significant scientific and practical interest, enhancing our understanding of gold geochemistry, its concentration processes in placers, and potential exploration criteria for both primary and placer gold deposits.

Methodology: the mineralogical and geochemical features of «hot stones» from the Khlebopek placer deposit were studied using optical and electron microscopy, atomic emission spectroscopy (ICP-OES), and X-ray diffraction analysis.

Results and Discussion: «Hot stones» are heterogeneous in specific gravity, elemental, and mineral composition, despite producing identical signals on gold-tuned detectors. The signal arises from the presence of both magnetic and conductive minerals within the stones, which interact with the electromagnetic field generated by the detector coil. Their combined action forms a complex structure of conductors, magnetic minerals, and piezoelectrics. «Hot stones» contain mineral forms of gold and silver, where noble elements exist not only in zero-valent states but also in oxidized forms, such as tellurides and stibnites. The association of «hot stones» with micro- and nanoforms of gold aligns with the electrical precipitation model. A unique feature of these stones is their exceptionally high content of nickel minerals.

Conclusions: the notion that «hot stones» primarily consist of magnetic iron minerals is incorrect. Their mineral composition is far more diverse. «Hot stones», containing noble elements in oxidized forms with micro- and nanoparticles, serve as the source that begins to form zero-valent gold upon entering the hypergene zone. Gold-bearing pyrite-pyrrhotite ores and their associated magnetic anomalies, easily detectable by UAV-based magnetometric surveys, can serve as regional exploration criteria for both lode and placer gold.

Keywords: «hot stones», specific gravity, mineral composition, gold, micro- and nanoforms.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Tatiana N. Polyakova, e-mail: imgre2010@yandex.ru

For citation: Lukyanenko V. A., Maltsev A. A., Mandrygina D. A., Polyakova T. N., Dubkov A. A., Kuznetsov Yu. A. Mineralogical and geochemical features of «Hot stones» based on the example of the Khlebopek placer deposit (Bodaybinsky district, Irkutsk oblast) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 2, pp. 32–42. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/2/32-42>

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

REFERENCES

- Onishchenko S. A., Sokerina N. V. Osobennosti formirovaniya zolotorudnogo chernoslanecovogo mestorozhdeniya Golec Vysochajshij (Vostochnaja Sibir') [Formation features of the Golts Vysochayshiy black shale gold deposit (Eastern Siberia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenij – Geology of Ore Deposits*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 154–173 (In Russ.)
- Tarasova Ju. I., Budjak A. E., Ivanov A. V., Gorjachev N. A., Ignat'ev A. V., Veliveckaja T. A., Radomskaja T. A., Blinov A. V., Babjak V. N. Tipomorfizm, tipohimizm i izotopno-geohimicheskie harakteristiki sul'fidov zheleza mestorozhdeniya Golec Vysochajshij (Vostochnaja Sibir') [Typomorphism, typochemistry, and isotope-geochemical characteristics of iron sulfides from the Gol'ts Vysochayshiy deposit (Eastern Siberia)]. *Zapiski Rossijskogo Mineralogicheskogo Obshhestva – Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2021, vol. 150, no. 1, pp. 63–75 (In Russ.)
- Konkin V. D., Ivanov A. I., Kotelnikov E. E., Vasjukov E. E., Zaharov I. O. K metodike ocenki prognoznnykh resursov zolota v uglerodistykh karbonatno-terrigennykh otlozhenijah Bodajbinskogo rudnogo rajona [Methodology for assessing prognostic gold resources in carbonaceous carbonate-terigenous deposits of the Bodaibo ore district]. *Otechestvennaja geologija – Russian Geology*, 2017, no. 4, pp. 64–80 (In Russ.)
- Tauson V. L., Nemerov V. K., Razvozhzaeva Je. A., Spiridonov A. M., Lipko S. V., Budjak A. E. Parageneticheskie otnosheniya pirita, ugleroda i zolota na mestorozhdenii Suhoj Log i tipomorfizm poverhnosti pirita [Paragenetic relationships of pyrite, carbon, and gold at the Sukhoi Log deposit and pyrite surface typomorphism]. *DAN – Proceedings of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 426, no. 4, pp. 529–532 (In Russ.)
- Ivanov A. I., Ageev Ju. M. Zakonomernosti formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdenij zolota Bodajbinskogo rudnogo rajona [Formation patterns of gold deposits in the Bodaibo ore district]. *Izvestija Sibirskogo otdelenija, sekcii nauk o Zemle. Irkutsk – Bulletin of the Siberian Branch, Earth Sciences Section*, 2005, no. 2, pp. 37–49 (In Russ.)
- Kuznecov Ju. A., Gribanov V. P., Varfolomeev S. D., Kalinichenko V. N., Mal'cev A. A., Dubkov A. A., Gulina A. A., Zhabin A. B. Mineralogo-geohimicheskie osobennosti sostava «plyvushhego zolota» na primere zolotorudnogo mestorozhdenija Hlebopjok (Bodajbinskij rajon, Irkutskaja oblast') [Mineralogical and geochemical features of «floating gold» composition at the Khlebopek gold deposit (Bodaibo district, Irkutsk Oblast)]. *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija – Subsoil of the Volga and Caspian Region*, 2024, no. 113, pp. 16–29 (In Russ.)
- Kuznecov Ju. A., Gribanov V. P., Varfolomeev S. D., Kalinichenko V. N., Dubkov A. A., Gulina A. A., Zhabin A. B. Issledovaniya izmenenij mineral'nogo sostava porod v rjadu «korennoj istochnik – kora vyvetrivanija – rossyp'» na primere pritokov zolotorudnogo mestorozhdenija Hlebopjok (Bodajbinskij rajon, Irkutskaja oblast') [Study of mineral composition changes in the sequence «primary source – weathering crust – placer» using tributaries of the Khlebopek gold deposit (Bodaibo district, Irkutsk Oblast)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 1, pp. 32–48 (In Russ.)
- Onufrienok V. V., Zvegintsev A. G. Possible types of ordering cation vacancies in structures of the NiAs type. *Journal of Inorganic Materials*, 1982, vol. 18, no. 3, pp. 301–304.
- Mashukov A. V., Onufrienok V. V. *Fizicheskie svojstva mineralov, inducirovannye tochechnymi defektami* [Physical properties of minerals induced by point defects]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Press publ., 2007, 224 p.
- Onufrienok V. V. Fazovye sootnosheniya sul'fidov zheleza v metastabil'nom sostojanii [Phase relations of iron sulfides in a metastable state]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 1991, vol. 33, no. 7, pp. 2213–2215 (In Russ.)
- Sazonov A. M., Onufrienok V. V., Kolmakov Ju. V., Nekrasova N. A. Pirrotin zolotosoderzhashhih rud: sostav, tochechnye defekty, magnitnye svojstva, raspredelenie zolota [Pyrrhotite of gold-bearing ores: Composition, point defects, magnetic properties, and gold distribution]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya «Tehnika i tehnologii» – Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2014, no. 6 (7), pp. 717–737 (In Russ.)
- Pisakin B. N. Identifikacionnye priznaki pirrotina kak kationodeficitnogo minerala [Identification features of pyrrhotite as a cation-deficient mineral]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta – Bulletin of St. Petersburg University*, 2004, ser. 7, vol. 1, pp. 3–13 (In Russ.)
- Pal'janova G. A., Sazonov A. M., Zhuravkova T. V., Sil'janov S. A. Sostav pirrotina kak indikator uslovij mineraloobrazovaniya na zolotorudnom mestorozhdenii Kovetskoe (Enisejskij Krjazh, Rossiya) [Pyrrhotite composition as an indicator of mineral formation conditions at the Sovetskoye gold deposit (Yenisei Ridge, Russia)]. *Geologija i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 7, pp. 934–954 (In Russ.)
- Streltsov S. V., Roizen V. V., Ushakov A. V., Oganov A. R., Khomskii D. I. Old puzzle of incommensurate crystal structure of calaverite AuTe₂ and predicted stability of novel AuTe compound. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2018, vol. 115, no. 40, pp. 9945–9950
- Dam B., Janner A. Incommensurate Morphology of Calaverite (AuTe₂) Crystals. *Physical Review Letters*, 1985, vol. 55, no. 21, pp. 2301–2304.
- Kudo K., Ishii H., Takasuga M., Iba K., Nakano S., Kim J., Fujiwara A., Nohara M. Nohara Superconductivity Induced by Breaking Te₂ Dimers of AuTe₂. *The Physical Society of Japan*, 2013, vol. 82, 063704.
- Varfolomeev S. D., Kalinichenko V. N., Kuznecov Ju. A., Zhabin A. V., Gachok I. V., Cybenova S. B. Matematicheskaja model' genezisa rossypnogo zolota [Mathematical model of placer gold genesis]. *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija – Subsoil of the Volga and Caspian Region*, 2024, vol. 114, pp. 58–70 (In Russ.)
- Varfolomeev S. D., Kalinichenko V. N., Kuznetsov Yu. A., Gachok I. V., Tsybenova S. B. Physicochemical model of the formation of alluvial gold. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2024, vol. 98, no. 12, pp. 2798–2809.