УДК 549.322:553.411 (571.53)

МЕТОД КАППАМЕТРИИ КАК ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЙ КРИТЕРИЙ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Гаврилов Роман Юрьевич¹,

GavrilovRY@tpu.ru

Синкина Екатерина Андреевна¹,

vea1986@mail.ru

Мицых Сергей Николаевич¹,

un7jgz@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности геолого-разведочных работ на рудное золото с использованием комплекса прогнозно-поисковых критериев и признаков.

Цель работы: изучение магнитной восприимчивости пород и руд месторождения Чертово Корыто методом каппаметрии и сопоставление полученных результатов с характером распределения золота и его элементов-спутников для разработки петрофизического прогнозно-поискового критерия золотого оруденения.

Методы исследования: изучение петрофизических свойств пород и руд, математическая обработка результатов и интерпретация геохимических и петрофизических данных.

Результаты. Установлено, что для метаморфизованных до эпидот-амфиболитовой фации аркозовых разнозернистых и мелкозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов пород михайловской свиты ($PR_{i}mh$) значения магнитной восприимчивости изменяются в пределах 0,009...0,359×10⁻³ ед. СИ. Показано, что магнитная восприимчивость (χ) в объеме минерализованной зоны месторождения Чертово Корыто обусловлена ферримагнитным пирротином, кристаллизующимся в моноклинной сингонии. Минерализованная зона месторождения уверенно геометризуется по данным каппаметрической съемки пород и руд значениями χ >1×10⁻³ ед. СИ. Установлено, что существует устойчивая пространственная (Au, As, Co, Ni) и корреляционная (Cu и Ag) связи между распределением элементов и магнитной восприимчивостью пород и руд при том, что высококонтрастные ореолы золота пространственно разобщены с аномальными ореолами магнитной восприимчивости. Вероятно, последнее обусловлена от сутствием золота в кварц-рутил-апатит-пирит-пирротиновом минеральном комплексе и разобщенным распределением золота и пирротина в кварц-пирит-арсенопирит-пирротиновом с золотом и кварц-полиметаллическом с золотом продуктивных минеральных комплексах. Разработанный петрофизический прогнозно-поисковый критерий золотого оруденения может успешно применяться на площадях, перспективных на аналогичный тип оруденения.

Ключевые слова:

Минерализованная зона, месторождение, магнитная восприимчивость, геохимия, рудные элементы, золото.

Постановка задачи

Одной из важных задач, стоящих перед геологоразведочной отраслью, является выделение перспективных площадей на стадии прогнозно-поисковых работ с целью наращивания минеральносырьевой базы. В последнее десятилетие в России при проведении геологоразведочных работ применяется высокоточное исследовательское оборудование, позволяющее оперативно получать те или иные характеристики изучаемых объектов (химический состав, физические свойства минералов, пород и руд и др.). Исследования по изучению свойств пирротина и их использование для установления технологических свойств руд, уточнения стадийности минералообразования на месторождениях различных полезных ископаемых активно проводятся с середины прошлого века [1–10 и др.]. Использование современного прецизионного аналитического оборудования существенно сокращает временные и материальные затраты на выделение перспективных участков и позволяет получить дополнительную информацию, направленную на оптимизацию дальнейших геологоразведочных работ. Прибор КТ-10 позволяет проводить измерение магнитной восприимчивости (χ) пород и руд за

считанные секунды. Метод каппаметрии успешно используется при геометризации золотого оруденения [11–13 и др.] и железных руд в Бакчарском рудопроявлении [14, 15], а также других видов полезных ископаемых.

В большинстве случаев промышленное золотое оруденение локализуется в участках земной коры, характеризующихся повышенными значениями магнитного поля [16–21 и др.]. Пирротин является единственным сульфидным минералом-ферримагнетиком, образовавшимся в процессе гидротермально-метасоматического преобразования пород в золоторудных месторождениях [22]. При этом магнитными свойствами обладает только пирротин, кристаллизующийся в моноклинной сингонии, а гексагональный является парамагнетиком [3, 23–25].

При изучении магнитной восприимчивости пород и руд месторождения Чертово Корыто [26–28] было установлено, что в распределении пирротина и золота наблюдается отчётливая взаимосвязь: интервалы с промышленным содержанием золота полностью локализуются в пределах ореола пирротинизации, но обособляются от участков с максимальными концентрациями сульфида. Данный вывод был сделан авторами на основании сравнения распределения значения показателя магнитной восприимчивости с контурами рудных тел по бортовому содержанию ($C_{\text{борт}}$) 1 г/т. В то же время сравнение распределения значений показателя магнитной восприимчивости с распределением рудных элементов, т. е. элементов, входящих в состав руды, в вышеперечисленных работах не проводилось.

В пределах крупнообъемного метасоматического ореола, представленного пятью минеральными комплексами [29], пирротин входит в состав трех минеральных комплексов: кварц-рутил-апатитпирит-пирротинового, кварц-пирит-арсенопиритпирротинового с золотом, кварц-полиметаллического с золотом.

Пирротины месторождения Чертово Корыто представлены гексагональной и моноклинной структурными модификациями, различающимися типоморфизмом (химическим составом, доменными структурами, микротвердостью) [25]. В пирротинах трех генераций в срастаниях сосуществуют две модификации в различных соотношениях. Количество моноклинной модификации увеличивается от ранней генерации к поздней. В последнем продуктивном минеральном комплексе количество моноклинного пирротина в три раза превышает его гексагональную разновидность.

Ранее распределение рудных элементов в объеме минерализованной зоны месторождения Чертово Корыто было изучено в двух аспектах. Первый касается изучения химических элементов с позиции поисковой геохимии [30]: построены карты распределения химических элементов на дневной поверхности и разведочных разрезах, создана объемная геолого-геохимическая модель месторождения. Второй подход рассматривает поведение элементов с геолого-генетической позиции [31], позволяющей реконструировать историю химических элементов в процессе геологического развития территории.

Целью работы является изучение магнитной восприимчивости пород и руд месторождения Чертово Корыто методом каппаметрии и сопоставление полученных результатов с характером распределения золота и его элементов-спутников для разработки петрофизического прогнозно-поискового критерия золотого оруденения.

Геологическое строение месторождения

Месторождение располагается на севере Иркутской области в северной части Патомского нагорья (рис. 1). Оно является типичным представителем мезотермального золотого оруденения [29].

Минерализованная зона расположена в синклинальной брахискладке, образованной толщей раннепротерозойских углеродистых пород михайловской свиты (PR₁mh). Углы падения слоев пород варьируют от субгоризонтальных до пологих (10...20°) с изменением направления падения от южного – на северном фланге месторождения – до северо-северо-западного – на южном. Складка осложнена флексурами более высоких порядков. Толща сло-



- Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Чертово Корыто по [31] с дополнениями: 1 – как правило (?), плохо отсортированные серые до темно-серых, от тонко- до среднезернистых, неяснослойчатые грубослоистые полевошпат-кварцевые песчаники, алевро-песчаники, углеродистые и безуглеродистые; 2 - как правило (?), плохо отсортированные темносерые разнозернистые, от мелко- до крупнозернистых тонкослойчатые до грубослоистых полевошпаткварцевые алевролиты, песчанистые алевролиты, углеродистые и безуглеродистые; 3 - аргиллиты серицитовые с незначительным (до 25 об. %) содержанием или отсутствием обломочной фракции песчаной и/или алевритовой размерности, углеродистые и безуглеродистые; 4 – азимут и угол падения слоев; 5 – область сульфидной минерализации; 6 – зоны тонкого рассланцевания и дробления пород; 7 - тыловые зоны (хлоритовая, альбитовая, березитовая) рудовмещающего метасоматического ореола
- Fig. 1. Scheme of geological structure of the Chertovo Koryto deposit [31] with additions: 1 - usually (?), poorly sorted gray to dark gray, thin- to medium-grained, non-clearlylayered coarsely-stratified feldspar-guartz sandstones, silty sandstones, carbon and carbon-free; 2 - usually (?), poorly sorted dark grey various-grained, fine- to coarse-grained thin-layered to coarsely-stratified feldspar-quartz siltstones, sandy siltstones, carbon and carbon-free; 3 - mudstones with minor sericite (up to about 25 vol. %) content or lack of detrital fractions of sand and/or silt dimension, carbon and carbon-free; 4 azimuth and dip angle of layers; 5 - area of sulphide mineralization; 6 - zones of thin foliation and crushing of rocks; 7 - rear zones (chlorite, albite, gold) of ore-bearing metasomatic halo

жена метаморфизованными до эпидот-амфиболитовой фации аркозовыми разнозернистыми, мелкозернистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами. Все породы обогащены восстановленным углеродом от долей до 2 об. %. Пачка терригенноосадочных пород подверглась метасоматическим изменениям пропилит-березитового типа с образованием многочисленных золото-сульфидно-карбонат-кварцевых жил и прожилков [25, 29, 31, 32].

Рудная залежь оконтурена по бортовому содержанию 0,5 г/т, контролируется глубинным разломом север-северо-западного простирания, падающим в запад-юго-западном направлении под углом около 60° . Локализованная в висячем боку разлома залежь полого (до 20°) погружается в западном направлении. Ее протяженность составляет 1,8 км, ширина – до 500 м, мощность достигает 140 м.

Методика исследования

Месторождение изучено поверхностными горными выработками и скважинами колонкового бурения глубиной до 250 м. Запасы золота подсчитаны по категориям C_1 и C_2 . По количеству подсчитанного благородного металла месторождение относится к крупным. В зависимости от принятых кондиций морфология рудных тел и их параметры могут изменяться.

Выполнено минералого-геохимическое картирование керна скважин и поверхностных горных выработок с отбором штуфных проб на минералогические и геохимические исследования [31].

Измерение магнитной восприимчивости штуфных образцов проведено прибором КТ-10. Максимальная чувствительность составляет 1×10⁻⁶ единиц СИ. Самая большая величина, которая может быть определена, составляет 999,99×10⁻³ единиц СИ. Функция автоматического переключения диапазонов измерений обеспечивает работу прибора в диапазоне с наибольшей чувствительностью.

Изучена магнитная восприимчивость (χ) образцов горных пород и руд, отобранных из 10 скважин буровой линии (БЛ) 19. Образцы были представлены штуфами половинок керновых проб, полученных путем распила керна диаметром 76 мм вдоль его оси на две равные части. Замеры проводились со стороны ровной поверхности (распила). Магнитная восприимчивость каждого образца измерялась не менее 3-х раз. Конечное значение χ по каждому образцу рассчитывалось как среднее арифметическое. Всего изучено 756 образцов, проведено 2314 измерений.

Эмиссионным спектральным полуколичественным методом в лаборатории Бодайбинской экспедиции по дубликатам штуфных образцов проведен анализ содержания 28 элементов. Во всех пробах определены: Ba, Be, Zr, Mn, Ti, V, Cr, Ni, Co, Pb, Cu, Zn, Sn, Mo, Li, Nb, Sr, Ag, As, Y, W, P, B. La, Sb, Bi, Yb, Tl, характеризующиеся содержаниями ниже чувствительности анализа.

Пробы на золото при средней длине керновой пробы 1 м анализировались пробирным методом в лабораториях дочерних предприятий Ленской золоторудной компании: ООО «Тонода» и ОАО «Первенец», предел обнаружения метода составил 0,1 г/т. Содержание золота и контроль результатов, полученных пробирным анализом, определялось атомно-абсорбционным методом, предел обнаружения – 0,01 г/т.

По результатам измерения показателя магнитной восприимчивости (χ) и геохимическим данным построены схемы распределения значений магнитной восприимчивости пород и руд, содержания золота и элементов-спутников оруденения по БЛ 19, рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции между ними.

Результаты исследования и их обсуждение

Руды месторождения Чертово Корыто сложены пятью минеральными комплексами [29], выделенными в ходе детального текстурно-структурного анализа руд с учетом диагностики генераций минералов на основе их химических составов, типоморфных свойств, номенклатуры и содержаний примесей в минералах, термодинамических режимов образования ранних и поздних генераций кварцев (рис. 2).

Наличие на месторождении одного ферримагнитного минерала, существенно влияющего на магнитную восприимчивость пород и руд, – пирротина, доказано детальным изучением минерального состава пород и руд месторождения [29, 31] и измерением их магнитной восприимчивости (рис. 2).

Из рис. 3 видно, что по мере уменьшения количества пирротина в штуфных пробах уменьшается и магнитная восприимчивость. Таким образом, магнитная восприимчивость в объеме минерализованной зоны связана с ферримагнитным пирротином.

В пределах крупнообъемного метасоматического ореола пирротин входит в состав трех минеральных комплексов: кварц-рутил-апатит-пирит-пирротинового, кварц-пирит-арсенопирит-пирротинового с золотом, кварц-полиметаллического с золотом.

Установлено, что для метаморфизованных осадочных терригенных пород михайловской свиты (PR₁mh) значения магнитной восприимчивости изменяются в пределах 0,009...0,359×10⁻³ ед. СИ. В крупнообъемном метасоматическом ореоле значения показателя магнитной восприимчивости (χ) существенно возрастают до 10×10⁻³ ед. СИ.

В ходе проведенного исследования построены схемы распределения показателя магнитной восприимчивости (χ), золота, серебра, мышьяка, кобальта, никеля по БЛ 19.

Ореол показателя магнитной восприимчивости (χ) представляет собой плитообразную фигуру, простирающуюся согласно минерализованной зоне (рис. 4). Значения показателя варьируют от 0,009×10⁻³ до 10×10⁻³ ед. СИ. Ореол магнитной восприимчивости практически полностью совпадает с контуром промышленной минерализации. В пределах контура промышленного оруденения, оконтуренного по $C_{\text{сорт.}}=0,5$ г/т, значения показателя χ превышают 1×10⁻³ ед. СИ.

	Минеральные комплексы руд								
Минералы	Кварц-рутил -апатит-пирит -пирротиновый С золотом		Кварц-пирит -арсенопири- товый с золотом	Кварц -полиметал- лический с золотом	Кварц- карбонатный				
Кварц Хлорит	I	Ш	IIIa,6 III	IV					
Серицит	—								
Альбит	—								
Эпидот	– ,	п	ш	IV					
Анкерит			III III		V				
Кальцит		<u> 11</u>	111	IV					
Ильменит									
Рутил, лейкоксен									
Апатит	I	п	III						
Апознатит		I	п						
Пирротии	I	п		Ш					
Халькопирит	I	п							
Сфадерит		<u> </u>		Ш					
Галенит				_					
Золото		I	II						
Ульманит		-							
Кобальтин			-						
Теллуровисмутит				-					
Самородный свинец				2					
Вильяманинит									
Мельниковит									
Тектонические	/		1						
подвижки, интенсив-	I								
ность их проявления	Вкр	апленная, прожи	илковая, гнездова	ая, брекчиевая					
Текстуры	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								
CTRUITTURI	Липидо	ранооластовая,	гранооластовая,	порфирооластова	ія,				
Структуры	взаимных границ, замещения, колломорфная								
T	100 000	услови	я образован 200 200	1 И Л <u>210</u> 110	120 80				
Температура, С	420380	420350	390200	210110	13080				
Давление, МПа	300250	230150	200140	15060	5040				
Соленость, мас. % экв. NaCl	86	158	2110	16,58	94,5				
Состав растворов	H ₂ O+NaCl+ CO ₂ +H ₂ S	H ₂ O+NaCl+ CO ₂ +H ₂ S	H ₂ O+NaCl+ MgCl ₂ +CO ₂ +CH ₄ +H ₂ S	$\begin{matrix} \mathrm{H_2O+NaCl+}\\ \mathrm{MgCl+CO_2+CH_4}\\ \mathrm{+N_2+H_2S} \end{matrix}$	H ₂ O+NaCl				

Рис. 2. Схема последовательности минералообразования в месторождении Чертово Корыто по [29] с дополнениями. Примечание. Толщина горизонтальной линии, напротив названия минерала, соотносится с его количеством в комплексе, а ее длина отражает временной интервал выделения минерала в комплексе; вертикальная пунктирная линия соответствует незначительным внутристадийным тектоническим подвижкам; толщина стрелки соответствует интенсивности межстадийных тектонических подвижек

Fig. 2. Sequence of mineral formation in the deposit Chertovo Koryto by [30] with additions. Note. Thickness of horizontal line, opposite the name of mineral, is correlated with its amount in the complex, and its length reflects the temporal interval of mineral selection in the complex; dotted vertical line corresponds to insignificant intra-stage tectonic movements; arrow thickness corresponds to intensity of inter-stage tectonic movements



- Рис. 3. Зависимость значения показателя магнитной восприимчивости от степени насыщенности образцов пирротиновой минерализацией. Стрелками показаны включения пирротина в штуфных образцах пород и руд; под каждым образцом указано значение показателя магнитной восприимчивости в n×10⁻³ ед. СИ
- **Fig. 3.** Dependence of the value of magnetic susceptibility index on degree of saturation of the samples with pyrrhotite mineralization. Arrows indicate the inclusions of pyrrhotite in massive samples of rocks and ores; the value of magnetic susceptibility index is given under each sample in n×10⁻³ SI units



- Рис. 4. Распределение показателя магнитной восприимчивости по БЛ 19: 1−3 – значения магнитной восприимчивости, п×10⁻³ ед. СИ: 1 – 1...1,5; 2 – 1,5...2; 3 – >2; 4 – буровая скважина и ее номер; 5 – контур рудного тела по С_{Борт.}=0,5 г/т
- **Fig. 4.** Distribution of magnetic susceptibility index at DL 19: 1–3 are the values of magnetic susceptibility, $n\times10^{-3}$ SI units.: 1 – 1...1,5; 2 – 1,5...2; 3 – >2; 4 is the borehole and its number; 5 is the contour of the ore body by $S_{cut-off}=0,5$ ppm

Таким образом, установлено, что минерализованная зона геометризуется значениями показателя магнитной восприимчивости, превышающими 1×10^{-3} ед. СИ.

В пределах разреза содержание золота изменяется от значений ниже порога чувствительности анализа до первых граммов на тонну (рис. 5). Ореол промышленных содержаний элемента, оконтуренный по содержанию Au=0,5 г/т, представляет собой уплощенную фигуру, плавно погружающуюся на запад-юго-запад. Внутри контура установлены единичные аномальные ореолы лентовидной формы с концентрацией Au>3 г/т. Ореол золота геометризуется значениями показателя χ , превышающими 1×10⁻³ ед. СИ. Высококонтрастные ореолы золота пространственно разобщены с аномально высокими ореолами показателя магнитной восприимчивости пород и руд.



Рис. 5. Распределение золота по БЛ 19: 1−3 – содержание золота, г/т: 1 – 0,5...1; 2 – 1...3; 2 – >3; 4−6 – значения магнитной восприимчивости, п×10⁻³ ед. СИ: 4 – 1...1,5; 5 – 1,5...2; 6 – >2; 7 – буровая скважина и ее номер

Fig. 5. Distribution of gold at DL 19: 1−3 is the gold content, g/t: 1 − 0,5...1; 2 − 1...3; 2 − >3; 4−6 are the magnetic susceptibility values, n×10⁻³ SI units.: 4 − 1...1,5; 5 − 1,5...2; 6 − >2; 7 is the borehole and its number В пределах месторождения преобладают субкларковые содержания серебра (рис. 6, a), ореол которого характеризуется гнездовым строением. Бо́льшая часть объема, занимаемого ореолами, представлена умеренно контрастными содержаниями Ag>0,1 г/т. Умеренно- и высококонтрастные ореолы представлены телами трубообразной, иглообразной форм. Минераграфическими исследованиями, в том числе с использованием сканирующего электронного микроскопа [29], минералы серебра, включая самородное серебро, в рудном теле не выявлены, однако отмечаются его включения в самородном золоте. Практически не проявлена связь в распределении ореолов серебра с показателем магнитной восприимчивости.





Fig. 6. Ore elements distribution along the section DL 19: a) silver; b) arsenic; c) cobalt; d) nickel. Legend, see Fig. 5

Содержания мышьяка в пределах минерализованной зоны существенно превышают фоновый уровень (рис. 6, δ). Концентрация элемента в контуре промышленного оруденения превышает зна-

чения 0,1...0,3 %. Наблюдается пространственная взаимосвязь в распределении χ и ореолов мышьяка, а их высококонтрастные аномалии пространственно разобщены. В основном минерале-носителе мышьяка – арсенопирите – отмечаются микропримеси кобальта и никеля, а также механическая примесь золота с включениями серебра.

Ореол концентрации кобальта (рис. 6, в) в целом совпадает с ореолом показателя магнитной восприимчивости (χ), образуя отдельный ореол с содержаниями >6 г/т над рудной залежью (С190-С193). В ряде случаев наблюдается совпадение высококонтрастных ореолов кобальта и золота. Из собственных минералов-носителей кобальта в незначительном количестве на месторождении установлен кобальтин [29].

Содержания никеля в пределах разреза по БЛ 19 представлены значениями 30 г/т и более. Его ореол пространственно совмещен с рудовмещающей толщей и практически полностью совпадает с ореолом χ (рис. 6, *г*). Повышенные содержания элемента обусловлены, прежде всего, присутствием в рудной зоне пирротина, арсенопирита и пирита.

Концентрации других элементов в породах и рудах месторождения редко превышают фоновые значения и не коррелируют с распределением показателя магнитной восприимчивости.

Ранговым корреляционным анализом установлена значимая положительная взаимосвязь между содержанием золота и показателем магнитной восприимчивости – r=0,22 (n=756). В то же время, как видно из табл. 1, содержания золота и показателя магнитной восприимчивости (χ) по буровым скважинам характеризуются различными коэффициентами корреляции. При этом значимая корреляционная связь между Аи и χ установлена в большинстве скважин.

Таблица 1.	Статистические параметры распределения содер-
	жания золота и показателя магнитной восприим-
	чивости по скважинам БЛ 19

Table 1. Statistical parameters of gold content distribution and magnetic susceptibility index in wells DL 19

№№ Скважин Drillhole no.		190	191	192	193	194	195	196	197	198	199
n		96	94	100	93	78	72	69	78	45	31
	r	0,25*	0,52	0,07	0,49	0,14	0,33	0,16	-0,28	-0,12	-0,38
Au	x _ф , г/т mean, ppm	0,21	0,50	0,45	0,62	0,40	1,01	4,96	0,31	0,38	0,25
x	<i>x</i> _{cp} , <i>n</i> ×10 ⁻³ mean, <i>n</i> ×10 ⁻³	0,71	0,94	1,19	1,55	1,25	1,07	0,69	0,91	0,97	0,92
Au	V, %	271	201	206	209	243	358	755	162	107	225
χ		141	91	112	116	100	107	176	130	145	102

Примечание. п – количество проб; r – ранговый коэффициент корреляции; x_{co} – среднее значение; V – коэффициент вариации значений, %; * – жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляционной связи между Au и χ

Note. n is the number of samples; r is the rank correlation coefficient, x_{co} is the mean value; V is the coefficient of values variation, %; * - the significant coefficients of correlation between Au and χ are in bold

Визуальное сравнение графиков распределения А ии χ по скважинам БЛ 19 свидетельствует о наличии положительной корреляционной связи в их распределении, что не всегда находит отражение при расчете рангового коэффициента корреляции. На рис. 7 показано распределение содержания золота и значения показателя магнитной восприимчивости, характеризующиеся положительной *r*=0,52 (скв. № 191) и отрицательной – *r*=-0,28 (скв. № 197) значимой корреляцией и отсутствием взаимосвязи – *г*=0,14 (скв. № 194). Отличия в характере взаимоотношения между золотом и показателем магнитной восприимчивости (χ) визуально не обнаруживаются, но устанавливаются методом ранговой корреляции, что в свою очередь обусловлено существенным разбросом значений обоих показателей, достигающим трех порядков.

Вместе с тем неустойчивый характер взаимосвязи между содержанием золота и показателем магнитной восприимчивости (χ) по отдельным скважинам, но значимая положительная корреляционная связь между показателями по БЛ 19 в целом, может также свидетельствовать об их сложной взаимосвязи на различных уровнях оруденения. Кроме того, независимо от характера взаимосвязи между Au и χ в скважинах, часто наблюдается смещение относительно друг друга высоких значений (пиков) данных показателей (рис. 5, 7), что, вероятно, обусловлено отсутствием золота в кварцрутил-апатит-пирит-пирротиновом минеральном комплексе и разобщенным распределением золота и пирротина в кварц-пирит-арсенопирит-пирротиновом с золотом и кварц-полиметаллическом с золотом продуктивных минеральных комплексах. Расхождение в пространственном распределении золотой и пирротиновой минерализации также отмечалось в работах [12, 27].

Для количественной оценки взаимосвязи между элементами-спутниками золотого оруденения месторождения Чертово Корыто и показателем χ были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляция (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты ранговой корреляции между руд-
ными элементами и показателем магнитной вос-
приимчивости по БЛ 19 (n=756)

Table 2.

and magnetic susceptibility indices at DL 19 ($n=756$)								
	Ni	Co	Pb	Cu	Zn Ag		As	χ
Ni	1,00	0,14*	-0,01	0,04	0,06	0,02	0,03	0,02
Со	0,14	1,00	-0,00	0,17	0,26	0,04	0,13	0,04
Pb	-0,01	-0,00	1,00	0,16	0,11	0,40	-0,05	-0,01
Cu	0,04	0,17	0,16	1,00	0,26	0,28	-0,06	0,14
Zn	0,06	0,26	0,11	0,26	1,00	0,07	0,05	0,07
Ag	0,02	0,04	0,40	0,28	0,07	1,00	-0,01	0,19
As	0,03	0,13	-0,05	-0,06	0,05	-0,01	1,00	0,01
γ	0.02	0.04	-0.01	0.14	0.07	0,19	0.01	1.00

Rank correlation coefficients between ore elements

* – жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляционной связи.

* - significant coefficients of correlation are in bold.



Рис. 7. Распределение содержания золота и значения показателя магнитной восприимчивости по скважинам БЛ 19: 1 – содержание золота, г/т; 2 – значение показателя магнитной восприимчивости (χ), n×10⁻³; 3 – коэффициент ранговой корреляции между Au и χ

Fig. 7. Distribution of gold content and magnetic susceptibility index in wells DL 19: 1 is the gold content, ppm; 2 is the magnetic susceptibility index (χ), n×10⁻³; 3 is the rank correlation coefficient between Au and χ

Значимую положительную корреляционную связь с показателем χ проявляют Cu и Ag. Рудные элементы эпизодически проявляют значимую положительную взаимосвязь между собой.

Полученные данные существенно отличаются от результатов сравнения схем распределения χ и рудных элементов по БЛ 19. Очевидно, что различие в наборах элементов, проявляющих пространственную (Au, As, Co, Ni) и статистически устойчивую корреляционную (Cu, Ag) взаимосвязь с показателем χ , обусловлено существенными вариациями сравниваемых значений.

Выводы

На месторождении Чертово Корыто пирротин является единственным минералом, обладающим повышенной магнитной восприимчивостью. Таким образом, аномальные значения показателя магнитной восприимчивости (χ) пород и руд, прежде всего, обусловлены наличием ферримагнитного пирротина, кристаллизующегося в моноклинной сингонии. Распределение значений показателя χ в породах и рудах БЛ 19 варьирует от 0,009×10⁻³ до 10×10⁻³ ед. СИ. Минерализованная зона месторождения (оконтуренная по $C_{\text{борт.}}$ =0,5 г/т) уверенно геометризуется по данным каппаметрической съемки значениями χ >1×10⁻³ ед. СИ.

Наиболее устойчивую пространственную взаимосвязь с показателем магнитной восприимчивости по разрезу БЛ 19 проявляют Au, As, Co и Ni. Элементы-спутники золотого оруденения образуют как собственные минералы на месторождении (арсенопирит, кобальтин), так и входят в состав большинства сульфидов в виде примеси [29]. По результатам исследования установлено, что высококонтрастные ореолы золота пространственно разобщены с аномальными ореолами показателя магнитной восприимчивости пород и руд, что, в свою очередь, выражается в неустойчивой корреляционной связи между показателями на различных уровнях оруденения.

Попытка объяснить пространственную разобщенность золота и моноклинного пирротина вытеснением золота из областей «стабильных минералов» в области «нестабильных структур» сделана в [12]. На наш взгляд, это может быть обусловлено отсутствием золота в минеральном комплексе, содержащем пирротиновую минерализацию, и разобщённым распределением золота и пирротина в продуктивных минеральных комплексах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Рамдор П. Минералы и их срастания. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 1132 с.
- Arnold R.G., Reichen L.E. Measurement of the metal content of naturally occurring metal deficient hexagonal pirrhotite by an X-ray spacing method // American Mineralogist. - 1962. -V. 47. - № 1-2. - P. 105-111.
- Грабовский М.А., Жерденко О.Н. Доменная структура пирротинов различного генезиса // Геология рудных месторождений. – 1964. – № 3. – С. 90–97.
- Caprenter R.H., Desborough G.A. Range and solid solution and structure of naturally occurring troilite and pyrrhotite // American Mineralogist. – 1964. – V. 49. – P. 1350–1364.
- Desborough G.A., Carpenter R.H. Phase relations of pyrrhotite // Econ. Geol. – 1965. – V. 60. – P. 1431–1450.
- Машуков А.В., Онуфриенок В.В. Физические свойства минералов, индуцированные точечными дефектами. – Красноярск: СФУ, 2007. – 224 с.
- Direen N.G., Pfeiffer K.M., Schmidt P.W. Strong remanent magnetization in pyrrhotite: a structurally controlled example from the Paleoproterozoic Tanami orogenic gold province, northern Australia // Precambrian Research. 2008. V. 165. № 1-2. P. 96-106.
- Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: Insights for ore genesis / H.V. Thomas, R.R. Large, S.W. Bull, V. Maslennikov, R.F. Berry, R. Fraser, S. Froud, R. Moye // Economic Geology. - 2011. - V. 106. - № 1. - P. 1-31.
- Paragenesis and composition of ore minerals in the Randalls BIFhosted gold deposits, Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for the timing of deposit formation and constraints on gold sources / J.A. Steadman, R.R. Large, G.J. Davidson, S.W. Bull, J. Thompson, T.R. Ireland, P. Holden // Precambrian Research. - 2014. - V. 243. - P. 110-132.
- Palyanova G., Kokh K., Seryotkin Y. Transformation of pyrite to pyrrhotite in the presence of Au-Ag alloys at 500 °C // American Mineralogist. – 2016. – V. 101. – № 12. – P. 2731–273.
- Шарафутдинов В.М., Хасанов И.М., Михалицына Т.И. Петрофизическая зональность Наталкинского рудного поля // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27. – № 5. – С. 89–103.
- Пирротин золотосодержащих руд: состав, точечные дефекты, магнитные свойства, распределение золота / А.М. Сазонов, В.В. Онуфриенок, Ю.В. Колмаков, Н.А. Некрасова // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – Т. 7. – № 6. – С. 717–737.

Количественная оценка взаимосвязи между элементами-спутниками золотого оруденения месторождения Чертово Корыто и показателем магнитной восприимчивости (с?) методом ранговой корреляции установила значимую положительную взаимосвязь показателя магнитной восприимчивости с содержанием Си и Ag.

Полученные результаты по сопоставлению петрофизических и геохимических данных в целом не противоречат выводам, полученным в [26, 27, 33–36]. Таким образом, представляется целесообразным использовать метод каппаметрии в комплексе с другими методами исследования при проведении геологоразведочных работ на рудное золото.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-35-00041\16).

- Mineralogical, chemical and micromorphological studies of the argillic alteration zone of the epithermal gold deposit Ovacik, Western Turkey: tools for applied and genetic economic geology / H.G. Dill, R. Dohrmann, S. Kaufhold, G. Cicek // Journal of Geochemical Exploration. - 2014. - V. 148. - P. 105-127.
- 14. Бакшт Ф.Б., Пшеничкин А.Я. О возможностях магнитометрии в комплексе ГИС на Бакчарском железорудном месторождении // Минерально-сырьевая база Сибири: история становления и перспективы: Международных научно-практический форум, посвященный 100-летию первого выпуска горных инженеров в Сибири и 90-летию Сибгеолкома. – Томск, 10–13 ноября 2008. – Томск: ТПУ, 2008. – Т. 1. – С. 211–214.
- Рудмин М.А. Фациальные особенности и магнитная восприимчивость рудовмещающих отложений Бакчарского железорудного проявления (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 48–55.
- Рудерман Е.Н. К созданию системы обнаружения золоторудных метасоматитов геофизическими и геохимическими методами // Геология и разведка. – 1990. – № 5. – С. 122–128.
- Ворошин С.В., Шарафутдинов В.М., Тюкова Е.Э. Аномалии петромагнитных параметров, обусловленные сульфидной минерализацией, и прогноз оруденения в Яно-Колымском золотоносном поясе // Тихоокеанская геология. – 2000. – Т. 19. – № 5. – С. 91–104.
- Абрамов В.Ю., Данилов М.С., Возможности петрофизики почв при поисках полезных ископаемых // Геофизика. – 2012. – № 2. – С. 72–79.
- Пахомов М.И., Пахомов В.И. Петрофизический метод выделения и оценки метасоматитов – М.: Недра, 1988. – 152 с.
- Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геофизические и петрофизические исследования малосульфидных кварцево-жильных месторождений золота Сибири // Геофизика. – 2014. – № 3. – С. 55–60.
- Ерофеев Л.Я., Ерофеева Г.В. Магнитное поле и природа аномалий на сульфидных кварцево-жильных месторождениях золота (на примере Дарасуна, В. Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 6. С. 16–22.
- 22. Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 346 с.
- 23. Онуфриенок В.В. Влияние примесных атомов на плотность катионных вакансий (на примере пирротина месторождения Панимба) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 6–11.
- Ward J.C. Interaction between cation vacancies in pyrrhotite // Solid State Communication. – 1971. – V. 9. – P. 357–361.

- Peculiarities of pyrrhotite mineralization in the Chertovo Koryto deposit (Patom Uplands) / E.A. Sinkina, O.V. Savinova, O.B. Nepryakhina, Yu.V. Kolbysheva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016 – V. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012011 (дата обращения: 02.02.2017).
- 26. Колмаков Ю.В., Соколов С.В., Гусев Е.В. Геодинамические условия образования месторождений золота в Патомском нагорье, Восточная Сибирь: фактор их проявления в аномалиях магнитного поля // Отечественная геология. 2010. № 4. С. 8–14.
- Соколов С.В. Петрофизика золотосульфидного оруденения в углеродистых толщах на примере месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье): дис.... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2011. – 86 с.
- Колмаков Ю.В. Золото-сульфидное месторождение Благодатное (Енисейский кряж, Россия): природа геофизических аномалий, последовательность и причины образования петрофизической зональности // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 11. – С. 1667–1681.
- 29. Вагина Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 63–69.
- Объемная геолого-геохимическая модель мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) / Р.Ю. Гаврилов, И.В. Кучеренко, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 30–43.
- 31. Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 11–20.

- Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikal, Russia. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016. Albena, Bulgaria, 30 June 2016 6 July 2016; Code 124231. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012011
- 33. Chernykh A.I. The permian-triassic gold mineralisation of the northwestern altai-sayany folded region // Surveying Geology and Mining Ecology Management: International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 1. - Albena; Bulgaria; 17-26 June 2014. - P. 341-344.
- 34. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits / A. Pshenichkin, Y. Oskina, O. Savinova, T. Dolgaya // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Tomsk; Russian Federation; 7–11 April 2014. – V. 21. DOI: 10.1088/1755–1315/21/1/012005
- 35. Ворошилов В.Г. Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабности оруденения // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – С. 3–19.
- Stimating Gold-ore Mineralization Potential Within Topolninsk Ore Field (Gorny Altai) / T. Timkin, V. Voroshilov, O. Askanakova, T. Cherkasova, A. Chernyshov, T. Korotchenk // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. – Tomsk; Russian Federation; 6–10 April 2015. – V. 43. DOI: 10.1088/1755–1315/27/1/012010

Поступила 01.03.2017 г.

Информация об авторах

Гаврилов Р.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Синкина Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мицых С.Н., студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. UDC 549.322:553.411 (571.53)

METHOD OF APPLETREE AS PROSPECTING CRITERIA OF GOLD MINERALIZATION

Roman Yu. Gavrilov¹,

GavrilovRY@tpu.ru

Ekaterina A. Sinkina¹, vea1986@mail.ru

Sergey N. Mitsykh¹,

un7jgz@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity to increase the efficiency of gold ore geological exploration works using the complex of forecasting and prospecting criteria and characteristics.

The aim of the research is to study the magnetic susceptibility of rocks and ore deposits of the Chertovo Koryto by the method of magnetic susceptibility measurements and comparison of the obtained results with the character of distribution of gold and its trace elements to develop the petrophysical prospecting criteria of gold mineralization.

Research methods: study of petrophysical properties of rocks and ores, mathematical processing of the results and interpretation of geochemical and petrophysical data.

Results. It was found out that the values of magnetic susceptibility for arkose inequigranular and fine-grained sandstone, siltstone and mudstone rocks of Mikhaylovskaya suite (PR₁mh) metamorphosed to the epidote-amphibolite facies varies within $0,009...0,359 \times 10^{-3}$ units SI. It is shown that magnetic susceptibility (χ) in the volume of the mineralized zone of the deposit Chertovo Koryto is caused by the ferrimagnetic pyrrhotite, crystallizing in the monoclinic system. The mineralized zone of the deposit is geometrized by the values of $\chi > 1 \times 10^{-3}$ units SI according to the data of magnetic susceptibility measurements of rocks and ores. It was ascertained that there is a strong spatial (Au, As, Co, Ni) and correlation (Cu and Ag) relation between the elements distribution and magnetic susceptibility of rocks and ores, the high contrast gold halos are spatially separated with abnormal halos of magnetic susceptibility. Probably the latter is caused by the lack of gold in quartz-rutile-apatite-pyrite-pyrrhotite mineral complex and dissociated distribution of pyrrhotite and gold in quartz-pyrite-arsenopyrite-pyrrhotite with gold and quartz-polymetallic and gold producing mineral complexes. The developed petrophysical forecasting and searching criteria of gold mineralization can be successfully applied in the potentially mineralization type areas.

Key words:

Mineralized zone, deposit, magnetic susceptibility, geochemistry, ore elements, gold.

The work was financially supported by the Russian Foundation for basic research (project $16-35-00041 \setminus 16$).

REFERENCES

- 1. Ramdor P. *Mineraly i ikh srastaniya* [Minerals and their fusion]. Moscow, Foreign literature Publ., 1962. 1132 p.
- Arnold R.G., Reichen L.E. Measurement of the metal content of naturally occurring metal deficient hexagonal pirrhotite by an X-ray spacing method. *American Mineralogist*, 1962, vol. 47, no. 1-2, pp. 105-111.
- Grabovsky M.A., Zherdenko O.N. Domain structure of pyrrhotines of different genesis. *Geology of ore deposits*, 1964, no. 1, pp. 90-97. In Rus.
- 4. Caprenter R.H., Desborough G.A. Range and solid solution and structure of naturally occurring troilite and pyrrhotite. *American Mineralogist*, 1964, vol. 49, pp. 1350–1364.
- Desborough G.A., Carpenter R.H. Phase relations of pyrrhotite. Econ. Geol., 1965, vol. 60, pp. 1431–1450.
- Mashukov A.V., Onufrienok V.V. Fizicheskie svoystva mineralov, indutsirovannye tochechnymi defektami [Physical properties of minerals, induced with point defects]. Krasnoyarsk, SFU Press, 2007. 224 p.
- Direen, N.G., Pfeiffer, K.M., Schmidt, P.W. Strong remanent magnetization in pyrrhotite: A structurally controlled example from the Paleoproterozoic Tanami orogenic gold province, northern Australia. *Precambrian Research*, 2008, vol. 165, no. 1–2, pp. 96–106.
- 8. Thomas H.V., Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V., Berry R.F., Fraser R., Froud S., Moye R. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and

reefs at Bendigo gold mine, Australia: Insights for ore genesis. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, no. 1, pp. 1–31.

- Steadman J.A., Large R.R., Davidson G.J., Bull S.W., Thompson J., Ireland T.R., Holden P. Paragenesis and composition of ore minerals in the Randalls BIF-hosted gold deposits, Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for the timing of deposit formation and constraints on gold sources. *Precambrian Re*search, 2014, vol. 243, pp. 110–132.
- Palyanova, G., Kokh, K., Seryotkin, Y. Transformation of pyrite to pyrrhotite in the presence of Au-Ag alloys at 500 °C. American Mineralogist, 2016, vol. 101, no. 12, pp. 2731–2737.
- Sharafutdinov V.M., Khasanov I.M., Mikhalitsyna T.I. Petrophysical zoning Natalka ore field. *Pacific Geology*, 2008, vol. 27, no. 5, pp. 89–103. In Rus.
- Sazonov A.M., Onufrienok V.V., Kolmakov Yu.V., Nekrasova N.A. Pyrrhotite in gold-bearing ores: composition, point defects, magnetic properties of gold distribution. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta*. Seriya: Tekhnika i tekhnologii, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 717–737. In Rus.
- Dill H.G., Dohrmann R., Kaufhold S., Cicek G. Mineralogical, chemical and micromorphological studies of the argillic alteration zone of the epithermal gold deposit Ovacik, Western Turkey: Tools for applied and genetic economic geology. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 148, pp. 105–127.
- Baksht F.B., Pshenichkin A.Ya. O vozmozhnostyakh magnitometrii v komplekse GIS na Bakcharskom zhelezorudnom mesto-

rozhdenii [On magnetometry opportunities in GIS complex on Bakcharskoye iron ore deposit]. *Mineralno-syrevaya baza Sibiri: istoriya stanovleniya i perspektivy: Mezhdunarodny nauchnopraktichesky forum, posvyashchenny 100-letiyu pervogo vypuska gornykh inzhenerov v Sibiri i 90-letiyu Sibgeolkoma* [Mineral raw material base of Siberia: history and prospects.International scientific practical forum]. Tomsk, 10–13 November 2008. Tomsk, TPU Publ. house, 2008. Vol. 1, pp. 211–214.

- Rudmin M.A. Facial features and magnetic susceptibility of orehosting sediments of Bakchar iron ore occurrence (Tomsk region). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 48-55. In Rus.
- Ruderman E.N. K sozdaniyu sistemy obnaruzheniya zolotorudnykh metasomatitov geofizicheskimi i geokhimicheskimi metodami [Development of a system for detecting gold metasomatite by geophysical and geochemical methods]. *Geologiya i razvedka*, 1990, no. 5, pp. 122–125.
- Voroshin S.V., Sharafutdinov V.M., Tyukova E.E. Petromagnetic anomalies caused by sulphide mineralization, and mineralization forecast in the Yana-Kolyma gold belt. *Pacific Geology*, 2000, vol. 1, no. 5, pp. 91–104. In Rus.
- Abramov V.Yu., Danilov M.S. Features of soil petrophysics in searching for minerals. *Geofizika*, 2012, no. 2, pp. 72–79. In Rus.
- Pakhomov M.I., Pakhomov V.I. Petrofizichesky metod vydeleniya i otsenki metasomatitov [Petrophysical method of allocation and assessment of metasomatites]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 152 p.
- Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Geophysical and petrophysical studies of low-sulfide quartz vein gold deposits in Siberia. *Geofizika*, 2014, no. 3, pp. 55–60. In Rus.
- Erofeev L.Ya., Erofeeva G.V. Magnetic field and the nature of the anomalies in the quartz-sulphide vein deposits of gold (on the example of Darasun, E. Transbaikal). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 16–22. In Rus.
- Nagata T. Magnetizm gornykh porod [Rock magnetism]. Moscow, Mir Publ., 1965. 346 p.
- Onufrienok V.V. Influence of impurity atoms on density of cationic vacancies (on the example of Panimba pyrrhotite deposit). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 6-11. In Rus.
- Ward J.C. Interaction between cation vacancies in pyrrhotite. Solid State Communication, 1971, vol. 9, pp. 357-361.
- Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B., Kolbysheva Yu.V. Peculiarities of pyrrhotite mineralization in the Chertovo Koryto deposit (Patom Uplands). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, vol. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012011
- Kolmakov Yu.V., Sokolov S.V., Gusev E.V. Geodynamic conditions of formation of gold deposits in Patom Highlands, Eastern Siberia: the factor of their displays anomalies in the magnetic field. *Home geology*, 2010, vol. 4, pp. 8–14. In Rus.

- 27. Sokolov S.V. Petrofizika zolotosulfidnogo orudeneniya v uglerodistykh tolshchakh na primere mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore). Dis. Kand. nauk [Petrophysics of gold-mineralization in carbonaceous strata on the example of the Chertovo Koryto deposit (Patom upland). Cand. Diss.]. Tomsk, 2011. 86 p.
- Kolmakov Yu.V. The Blagodatnoe gold-sulfide deposit (Eniseyskiy kryazh, Russia): the nature of geophysical anomalies and the succession and causes of formation of petrophysical zoning. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 11, pp. 1321–1332. In Rus.
- Vagina E.A. Mineral ore complexes and genesis of gold deposit Chertovo Koryto (Patom upland). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 63-69. In Rus.
- Gavrilov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Solid geological and geochemical model of mesothermal gold deposit Chertovo Koryto (Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 30–43. In Rus.
- Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petro-geochemical characteristics of ore-hosting mesatomatic halo of Chertovo Koryto gold-ore deposit (the Patom upland). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 11-20. In Rus.
- 32. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikal, Russia. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, SGEM 2016. Albena, Bulgaria, 30 June 2016 6 July 2016. Code 124231. DOI: 10.1088/1755–1315/43/1/012011
- 33. Chernykh A.I. The permian-triassic gold mineralisation of the northwestern Altai-Sayany folded region. International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 1. Albena; Bulgaria; 17-26 June 2014. pp. 341-344.
- Pshenichkin A., Oskina Y., Savinova O., Dolgaya T. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Tomsk; Russian Federation; 7–11 April 2014. Vol. 21. DOI: 10.1088/1755–1315/21/1/012005
- 35. Voroshilov V.G. Anomalnye struktury geokhimicheskikh poley gidrotermalnykh mestorozhdeniy zolota: mekhanizm formirovaniya, metodika geometrizatsii, tipovye modeli, prognoz masshtabnosti orudeneniya [Anomalous structures of geochemical fields of hydrothermal gold deposits: formation mechanism, methods of geometrization, typical models, and forecasting of ore mineralization]. *Geology of ore deposit*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 3–19.
- Timkin T., Voroshilov V., Askanakova O., Cherkasova T., Chernyshov A., Korotchenk T. Estimating Gold-ore Mineralization Potential Within Topolninsk Ore Field (Gorny Altai). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Tomsk; Russian Federation; 6–10 April 2015. Vol. 43. DOI: 10.1088/1755–1315/27/1/012010

Received: 1 March 2017.

Information about the authors

Roman Yu. Gavrilov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina A. Sinkina, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey N. Mitsykh, student, National Research Tomsk Polytechnic University.