

УДК 553.411.071:550.4

## АНОМАЛЬНОЕ ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРТОВО КОРЫТО (ЛЕНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН)

Гаврилов Роман Юрьевич,  
GavrilovRY@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности прогнозно-поисковых работ на рудное золото на основе геохимических данных.

**Цель:** создание модели аномальной структуры геохимического поля месторождения Чертово Кoryто для выявления дополнительных прогнозно-поисковых критериев золоторудных объектов в углеродисто-карбонатно-терригенных толщах.

**Методы:** статистическая обработка геохимических данных, геохимическое моделирование.

**Объект:** первичный геохимический ореол золоторудного месторождения Чертово Кoryто.

**Результаты.** Статистические параметры распределения металлов в крупнообъемном метасоматическом ореоле свидетельствуют об интенсивных гидротермально-метасоматических процессах, выразившихся, в первую очередь, в отложении высококонцентрированных растворов, содержащих Au, As, Ag, Pb. На основе обработки геохимических данных по первичным ореолам рассеяния создана модель геохимической зональности золоторудного месторождения Чертово Кoryто. Установлено концентрически-зональное строение аномальной структуры геохимического поля месторождения. Ранняя Ba-Be-Zr-Ti-Y ассоциация элементов, выщелоченных и перетолженных в процессе кислотного метасоматоза (кварц-рутил-пирит-пирротинный комплекс), окаймляет периферию минерализованной зоны. В промежуточной зоне метасоматического ореола распространена Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As) геохимическая ассоциация, обусловленная образованием кварц-пирит-арсенопирит-пирротинного комплекса, завершающего березитизацию. Отложение Au-As ассоциации происходило в более позднее время, с образованием арсенопирита в составе кварц-пирит-арсенопиритового с золотом минерального комплекса. Наиболее поздняя ассоциация Au-Ag-Pb-Zn-Cu полиметаллической с золотом стадии рудообразования (золото, галенит, сфалерит, халькопирит) приурочена к центральной части метасоматически измененных пород. Комплекс методов обработки геохимической информации совместно с использованием данных минералого-геохимического картирования обеспечил расшифровку аномальной структуры геохимического поля месторождения. Полученные результаты позволили дополнить существующее представление об аномальной структуре геохимического поля золоторудного месторождения Чертово Кoryто.

### Ключевые слова:

Золото, Ленский рудный район, аномальная структура геохимического поля, геохимическая зональность, математическая статистика.

### Постановка задачи

В последнее десятилетие поисковая геохимия переживает бурные времена, связанные с внедрением новых методов и методик обработки геохимической информации [1–12]. В первую очередь это связано с проведением работ в более сложных горно-геологических условиях, что требует применения нестандартных решений, зачастую более трудозатратных и, как следствие, дорогостоящих, но позволяющих выйти на конкретный объект с оценкой прогнозных ресурсов и подсчетом запасов соответствующих категорий [13]. Стандартные наборы методов обработки фактического материала не всегда позволяют получать адекватную информацию об объекте исследования [14]. Уникальные месторождения золота (Олимпиадинское, Наталка, Сухой Лог и др.) уже открыты и эксплуатируются, а для регулярного наращивания запасов металла недостаточно проводить их переоценку, необходимо открытие десятков крупных–мелких месторождений либо перевод ресурсов в промышленные категории уже известных объектов. Все это, применительно к российской геологоразведочной отрасли, делает жизненно необходимым использование в прогнозно-поисковой практике нетрадиционных подходов.

Одной из основ успешного прогнозирования месторождений полезных ископаемых является разработка геохимических, минералогических, геофизических, структурно-динамических и других моделей месторождений. Процесс создания корректной модели месторождения зависит от качества фактического материала, методов его обработки, интерпретации и квалификации исполнителя. В настоящее время существующими методами обработки геохимических данных возможно успешно переинтерпретировать имеющийся банк аналитической информации второй половины прошлого столетия.

В 2006–2007 гг. на золоторудном месторождении Чертово Кoryто силами сотрудников Томского политехнического университета под руководством профессора И.В. Кучеренко на основе хозяйственно-договорных отношений с ООО «Тонода» (дочерней компанией ОАО «Ленская золоторудная компания», г. Бодайбо) проводились полевые исследования с отбором каменного материала [15–21].

Целью настоящей работы явилось создание модели аномальной структуры геохимического поля (АСГП) золоторудного месторождения, залегающего в углеродисто-терригенном субстрате, с использованием максимально возможного перечня

определенных элементов, для выявления дополнительных поисковых критериев золоторудных объектов в углеродисто-карбонатно-терригенных толщах.

#### Геологическая характеристика месторождения

Наиболее подробно месторождение Чертово Кори́то охарактеризовано в работах [15, 16]. Оно расположено в Иркутской области, на водоразделе рр. Тоноды и Кевакты, бассейна р. Бол. Патома, в 185 км севернее районного центра г. Бодайбо.



Рис. 1. Географическое положение месторождения Чертово Кори́то

Fig. 1. Location of the Chertovo Koryto deposit

Вмещающая оруденение раннепротерозойская толща углеродистых терригенных сланцев михайловской свиты образует брахисинклинальную складку с пологим ( $10...20^\circ$ ) падением слоев. Южное направление падения слоев на севере сменяется на западное и далее на северо-северо-западное – на юге месторождения. Брахискладка рассекается тектоническим швом северо-северо-западного простирания, оперяющим Амандракский глубинный разлом. Свита сложена метаморфизованными до эпидот-амфиболитовой фации песчаниками, алевролитами, аргиллитами, подвергшимися воздействию гидротермального метасоматизма пропилит-березитового типа. Рудовмещающие метасоматиты содержат многочисленные сульфидно-кварцевые прожилки и сульфидную вкрапленность пирита, пирротина, арсенопирита и других минералов, встречающихся гораздо реже. Рудная залежь оконтурена по данным непрерывного опробования и прослежена вдоль разлома на расстояние 1800 м, имеет максимальную мощность около разлома до 140 м. Залежь полого погружается на запад, постепенно выклиниваясь. Ее протяженность по падению достигает 500 м.

При детальном изучении 4 литологических разрезов (БЛ 7, 8а, 19, 30) не установлено взаимосвязи в распределении золота и литологических разностей пород.

#### Методика исследования

В основу исследования положены результаты опробования керна колонковых разведочных скважин, пробуренных на месторождении по сети  $50 \times 50$  м.

Опробование керна разведочных скважин проведено с целью определения содержания золота и его элементов-спутников. Содержание золота в керновых пробах определено пробирным и атомно-абсорбционным методами анализа, а элементов-спутников золоторудной минерализации в сколовых пробах – эмиссионным спектральным приближенно количественным соответствием. Длина секций в среднем составляла один метр при керновом и три метра при сколовом опробовании.

Геохимические пробы анализировались на Ba, Be, Zr, Mn, Ti, V, Cr, Ni, Co, Cu, Pb, Zn, Sn, Mo, Li, Sr, Ag, As, Y, P, B. Элементы La, Nb, Sb, W, Bi, Yb, Tl в связи с низкой чувствительностью анализа не были обнаружены, либо вариации их содержаний характеризуются одним–двумя значениями, что не позволяет использовать их при статистической обработке геохимических данных. Секционные сколовые пробы также анализировались на содержание золота химико-спектральным анализом, чувствительность метода 0,01 г/т.

Для расчета статистических показателей по элементам-спутникам золотого оруденения были использованы анализы 4124 сколовых проб по керну скважин. Фоновые содержания элементов были получены на основе аналитических данных 170 керновых проб из скважин, расположенных за пределами минерализованной зоны.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Содержания основных рудных элементов (золото, мышьяк, серебро, свинец, цинк, медь, кобальт, никель) в первичных ореолах рассеяния изменяются в широких пределах от фоновых до значений в несколько сот раз их превышающих. Это в свою очередь отражается на сложных законах распределения элементов.

Распределение содержания золота на основе результатов кернового опробования дает наглядное представление о характере поведения металла в месторождении (рис. 2). Содержание золота в рудном теле колеблется от  $n \times 0,01$  до  $n \times 100$  г/т. Центральная часть характеризуется наибольшей мощностью рудного тела наряду с высокими концентрациями благородного металла. Периферия рудной залежи представлена отдельными рудными линзами мощностью до первых метров с самыми низкими содержаниями золота. Пробность золота закономерно возрастает в ряду верхний→средний→нижний уровень оруденения, изменяясь в пределах 744...971 ‰, при среднем значении 852 ‰.

Мышьяк, серебро и свинец образуют высококонтрастные ореолы, проявляющие устойчивую пространственную взаимосвязь с золоторудной минерализацией. Ореол мышьяка, характеризую-

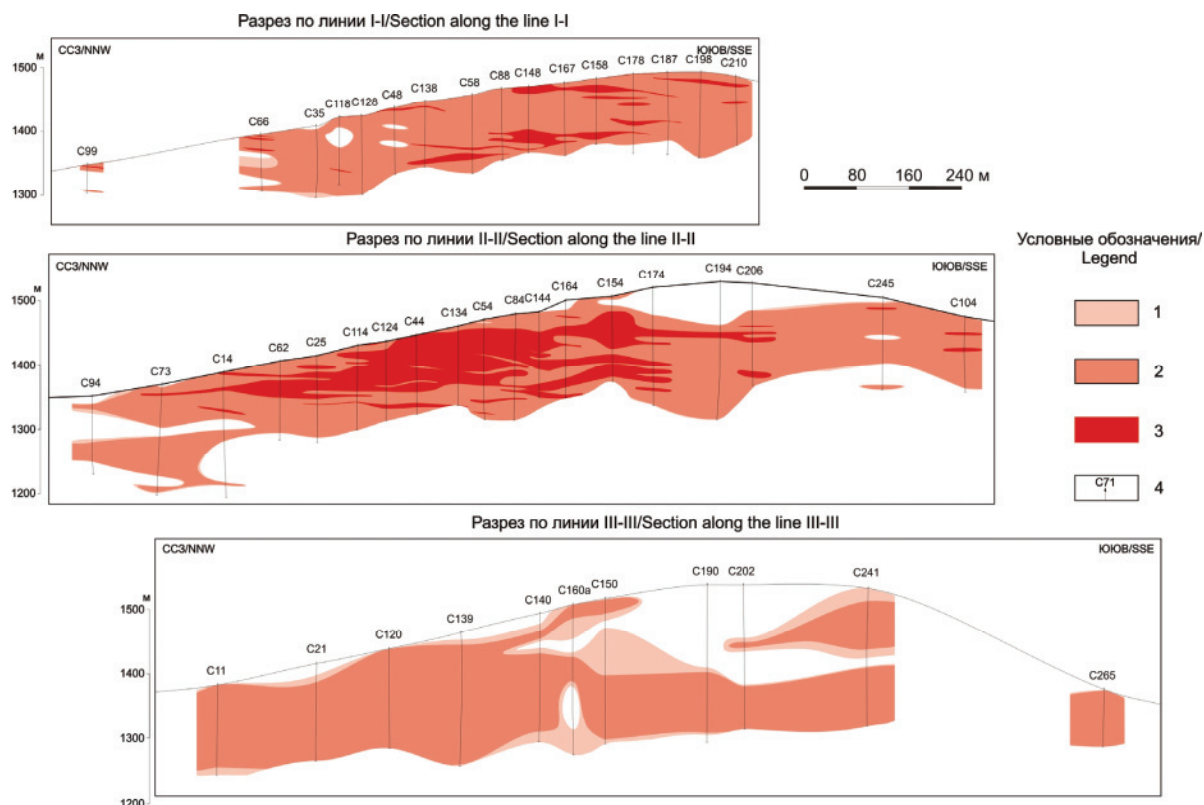


Рис. 2. Распределение золота в рудовещающем метасоматическом ореоле месторождения. 1–3 – содержание золота, г/т: 1 – 0,1>; 2 – 0,1...1; 3 – 1<; 4 – разведочные скважины и их номера

Fig. 2. Gold distribution in the ore-hosting metasomatic aureole of the deposit. 1–3 – gold content, ppm: 1 – 0,1>; 2 – 0,1...1; 3 – 1<; 4 – exploration wells and their numbers

щийся крайне высокими значениями, достигающими первые проценты, в центральной части минерализованной зоны совмещен с высококонтрастными ореолами золота. На периферии рудной зоны ореол мышьяка существенно выходит за ее пределы и не проявляет взаимосвязи с распределением содержания золота. Ореол серебра проявляет неустойчивую пространственную связь с ореолом золота. Аномальные значения серебра преимущественно приурочены к контурам рудной минерализации, достигая значений, превышающих фоновые в сотни раз. Ореол свинца характеризуется неоднородным распределением, находясь как в контурах промышленной минерализации, так и за их пределами.

Основные рудные элементы – золото, мышьяк, серебро, свинец, цинк, медь, кобальт, никель – в объеме минерализованной зоны проявляют устойчивую корреляционную связь между собой. Ag, Pb, Zn характеризуются наибольшей теснотой связи ( $r > 0,32$ ), при  $r_{\text{крит.}} = 0,03$  для 5 % уровня значимости. Образующие в пределах месторождения контрастные аномалии Ag и As также обладают высоким значением корреляционной связи между собой –  $r = 0,27$ . Содержание золота, определенное по сколовым геохимическим пробам химико-спектральным анализом, несмотря на наличие лишь 30 % проб, превышающих порог обнаруже-

ния анализа, проявляет устойчивую взаимосвязь с распределением содержания мышьяка ( $r = 0,25$ ). Тем не менее, в силу целого ряда причин (уровень концентрации, предел обнаружения и др.), результаты определения золота по сколкам и керну скважин, за исключением кластер-анализа переменных, при дальнейших расчётах статистических показателей не использовались.

Энергия рудообразования (ЭР) рассчитывалась по методике, предложенной Н.И. Сафроновым [22]. Внутри минерализованной зоны субфоновые значения показателя до 2 ед. практически отсутствуют. В контуре рудной минерализации значения показателя возрастают до  $10^4$  ед. и более. В нашем случае аномальные концентрации мышьяка, достигающие 100...2000 коэффициентов концентрации (КК), оказывают существенное влияние на значения показателя энергии рудообразования.

Провести оценку уровня перераспределения вещества в процессе рудообразования можно на основе расчета показателей дисперсии (ДГС) и вариации (ВГС) геохимического спектра [23]. При этом необходимо крайне тщательно подходить к расчёту фоновых содержаний элементов геологических образований.

Фоновые значения ДГС в прилегающем к месторождению пространстве редко превышают 1 ед. В контуре минерализованной зоны значения пока-

зателя резко возрастают до  $10^5$  ед. и более. Доминирующим элементом при расчете показателя ДГС также является мышьяк, что в свою очередь отражается на прямой взаимосвязи в расположении их ореолов в пространстве. В целом минерализованная зона характеризуется значениями показателя, изменяющимися в широких пределах от 10 до 500 ед.

Фоновые значения показателя ВГС не превышают 40 % и в пределах минерализованной зоны встречаются достаточно редко. В рудных интервалах значения показателя возрастают в разы, достигая 450 %. Наиболее контрастные ореолы ВГС расположены на границе минерализованной зоны, что, по нашему мнению, обусловлено относительно резким изменением химического состава горных пород от минерализованной зоны к вмещающему субстрату.

Как известно, коэффициент вариации рассчитывается с использованием показателя дисперсии, а точнее стандартного отклонения от среднего. Тем не менее, как показано в ряде работ, они несут разную смысловую нагрузку [24]. Несмотря на существенное влияние отдельных рудных элементов на значения показателя, их ореолы, в том числе и на месторождении Чертово Кoryто, не всегда совпадают друг с другом.

Установлено, что на значения показателей ДГС и ВГС существенное влияние оказывают концентрации мышьяка, серебра, свинца. В связи с этим следует обращать особое внимание на спектр эл-

ментов, используемых при расчете данных показателей.

Расчет показателей ДГС и ВГС без высококонтрастных элементов уменьшает значения показателей в несколько раз и сокращает объем их ореолов в пределах минерализованной зоны.

Таким образом, показатели интенсивности процессов рудообразования коррелируют с объемом, занимаемым рудной зоной. Тем не менее без использования дополнительных методов обработки они не позволяют провести интерпретацию АСПП месторождения.

На основе *кластер-анализа* выявлена структура взаимосвязи между элементами. Выделились 4 группы элементов: 1) Au, As, B, Sr, P, Mo; 2) Ag, Zn, Pb; 3) Li, Co, Sn, Cu, Ni, Cr, V, Mn; 4) Ti, Y, Zr, Be, Ba.

Методом К-средних 4124 наблюдения (проб) были разделены на 7 кластеров (таблица). Во всех классах проб, за исключением 4-го, наибольшими концентрациями отличается мышьяк. В первом и втором кластерах преобладают As (до 800 КК), Pb (до 4,9 КК) и Ag (до 3,3 КК), что обусловило их пространственное совмещение с высококонтрастными ореолами золота. Третий кластер проб, также отличающийся высокими концентрациями мышьяка (до 102 КК), в целом тяготеет к периферии рудного тела. Для геохимического спектра четвертого кластера характерна высокая концентрация (в порядке убывания) Ag, Pb, Zn и As. Пробы кластера распространены в пределах рудного тела

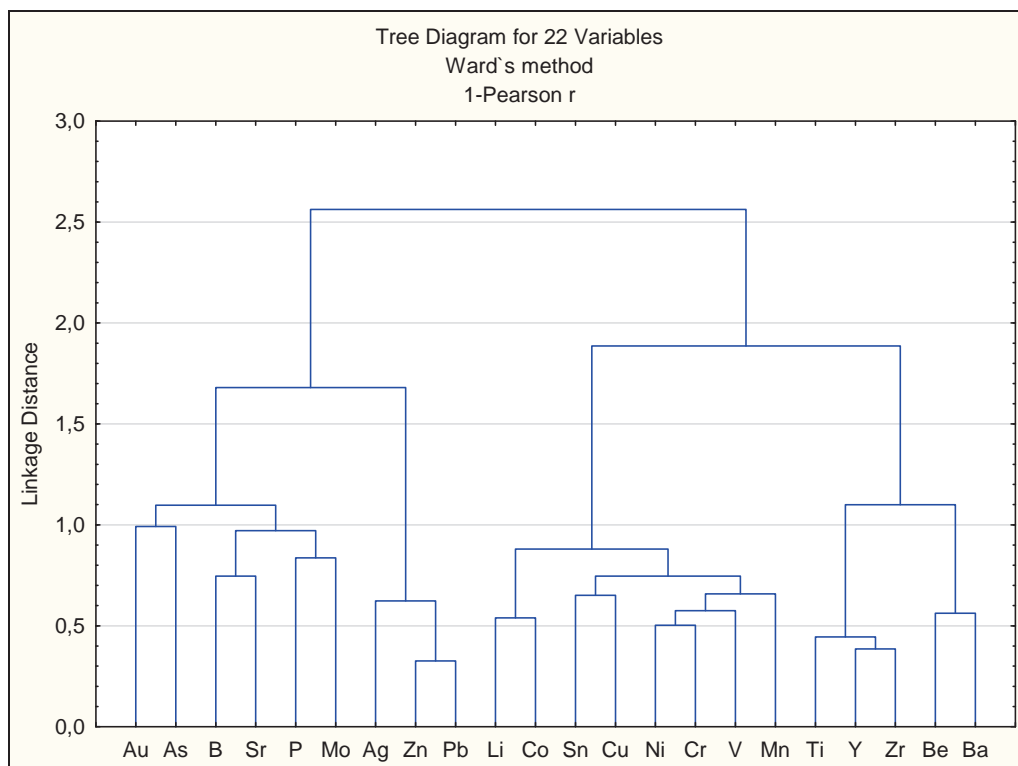


Рис. 3. Результаты кластер-анализа по первичным ореолам рассеяния

Fig. 3. Results of cluster analysis on primary halos of dispersion



и отражают пространственное расположение галенит-халькопирит-сфалеритовой минерализации. Пятый и шестой кластеры характеризуются близкими значениями концентрации элементов, отличающаяся лишь содержанием мышьяка. Тем не менее пробы пятого кластера располагаются за пределами контура рудного тела либо внутри контуров «пустых» прослоев, а пробы, характеризующие геохимический спектр шестого кластера, практически полностью отсутствуют внутри контура рудного тела и характеризуют слабо измененные вмещающие породы. Концентрации элементов седьмого кластера эпизодически появляются как в контуре рудного тела, так и за его пределами и отличаются содержаниями элементов близкими к фоновым, с превышением в 2...3 раза по As и В.

Таблица. Геохимический спектр кластеров в КК

Table. Geochemical spectrum of clusters in CC

Элемент Element	Кластер/Cluster						
	1	2	3	4	5	6	7
Ba	1,01*	1,04	0,99	1,59	1,04	1,04	1,03
Be	1,04	1,06	1,03	1,50	1,03	1,03	1,03
Zr	1,10	0,94	0,89	2,07	0,94	0,88	0,97
Mn	1,13	1,06	1,00	1,02	1,03	1,03	0,97
Ti	0,72	0,66	0,61	1,16	0,66	0,65	0,62
V	0,99	0,90	0,87	1,00	0,88	0,88	0,79
Cr	1,10	1,00	0,96	1,20	1,00	0,96	0,89
Ni	1,40	1,33	1,23	1,67	1,15	1,18	1,06
Co	0,80	0,75	0,70	1,50	0,73	0,72	0,66
Pb	4,89	2,23	1,78	196	2,03	1,81	1,43
Cu	1,12	1,09	1,03	1,10	1,05	1,05	0,97
Zn	1,41	1,34	1,34	25,8	1,22	1,25	1,11
Sn	1,00	0,96	0,95	1,38	0,95	0,96	0,87
Mo	0,95	1,01	1,00	0,70	1,05	1,03	1,02
Li	0,66	0,65	0,65	0,56	0,67	0,65	0,62
Sr	1,20	1,23	1,20	0,96	1,19	1,21	1,19
Ag	3,30	2,59	2,06	307	2,05	2,07	1,22
As	869	294	102	16,5	13,5	40,5	3,35
Y	1,00	0,96	0,97	1,25	0,96	0,93	0,97
P	1,67	1,87	1,66	1,60	1,68	1,69	1,50
B	2,84	2,82	2,85	1,81	2,43	2,51	2,36

\* – нормирование содержания элементов проведено на фоновые в месторождении.

\* – element content is normalized to the background ones in the deposit.

Выявленные в кластерах ассоциации элементов позволили провести разделение проб на «породные» (5–7 кластеры) и «рудные» (1–4 кластеры). По результатам кластер-анализа установлено зональное строение геохимического ореола месторождения, выразившееся в изменении геохимического спектра пород и руд от крайне неоднородного в центральной зоне (As до 800 КК, Pb до 4,9 КК, Ag до 3,3 КК) вплоть до фоновых значений концентрации элементов во фронтальной.

Для уточнения ассоциаций элементов и расфировки АСПП был проведен факторный анализ. Было выделено три ассоциации элементов, суммарный вклад которых в общую дисперсию составляет 43 %. Геометризация значений факторов проиллюстрирована на примере разведочной линии БЛ 15 (рис. 4).

Ассоциация элементов Ba, Be, Zr, Ti, Y характерна для фронтальной зоны гидротермально-метасоматического ореола и отражает процесс выноса элементов из его центральной зоны на периферию в процессе березитизации.

Распределение значений первого фактора обусловлено привнесом в метасоматический ореол Cr, Ni, Co, Cu, Mn, V, Sn, P на этапе завершения березитизации и их вытеснением из центральной зоны в последующие стадии рудоотложения. По данным минералого-геохимического картирования, As концентрируется в ядерной зоне в форме арсениопирита. Ассоциация Pb, Zn, Ag связана с образованием наиболее позднего продуктивного полиметаллического минерального комплекса.

На основе статистической обработки геохимических данных с использованием данных минералого-геохимического картирования составлена обобщенная модель геохимической зональности месторождения (рис. 5).

Установленные геохимические ассоциации согласуются со схемой стадийности минералообразования [18].

Ранняя Ba-Be-Zr-Ti-Y ассоциация элементов, выщелоченных и переотложенных в процессе кислотного метасоматоза (кварц-рутил-пирит-пирро-

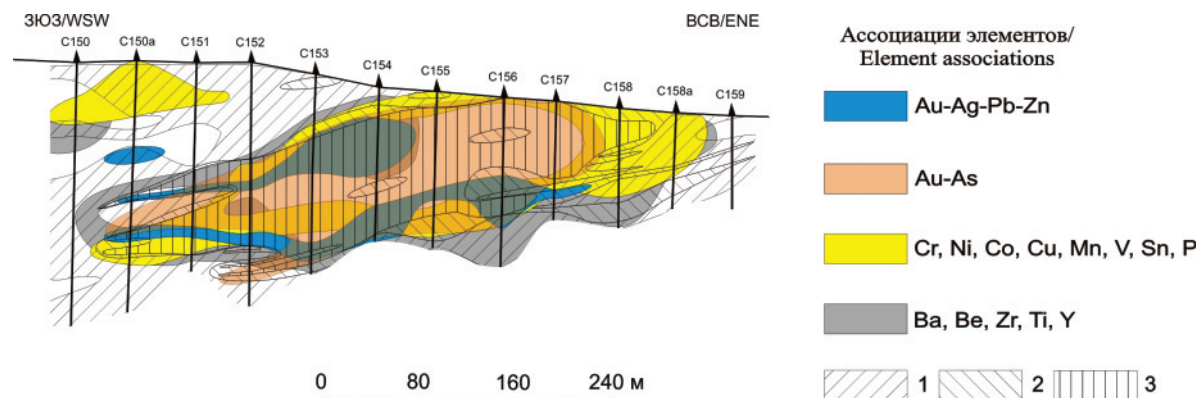


Рис. 4. Распределение геохимических ассоциаций на основе факторного анализа. Содержание золота, г/т: 1 – 0,1>; 2 – 0,1...1; 3 – 1<

Fig. 4. Distribution of geochemical associations of elements based on factor analysis. Gold content, ppm: 1 – 0,1>; 2 – 0,1...1; 3 – 1<

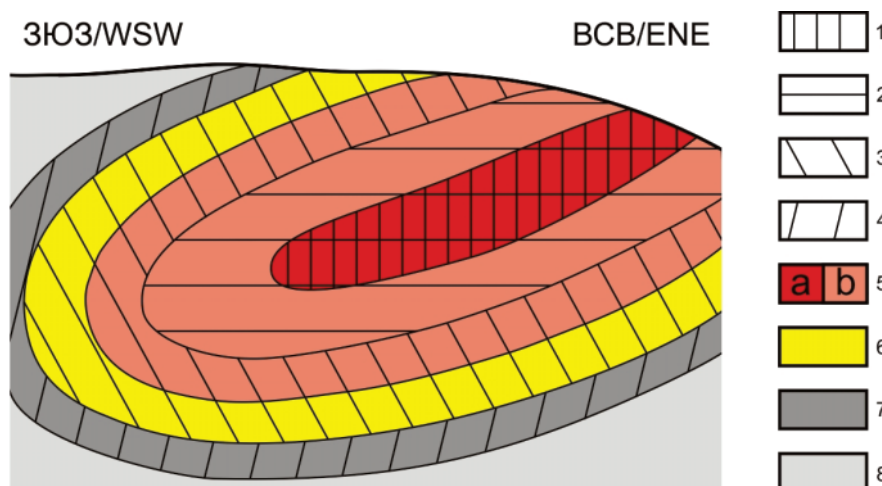


Рис. 5. Обобщенная модель геохимической зональности месторождения Чертово Кoryто. 1–4 – минеральные комплексы/геохимические ассоциации от поздних к ранним: 1 – кварц-полиметаллический с золотом/Au-Ag-Pb-Zn-Cu; 2 – кварц-пирит-арсенопиритовый с золотом/Au-As; 3 – кварц-пирит-арсенопирит-пирротитовый/Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As); 4 – кварц-рутил-пирит-пирротитовый/Ba-Be-Zr-Ti-Y; 5–7 – зоны метасоматического ореола: 5 – центральная; подзоны а) полиметаллическая; б) мышьяковая; 6 – промежуточная; 7 – фронтальная; 8 – вмещающие породы

Fig. 5. Generalized model of geochemical zonation of the Chertovo Koryto deposit. 1–4 – mineral complexes/geochemical associations from late to early: 1 – quartz-polymetallic with gold/Au-Ag-Pb-Zn-Cu; 2 – quartz-pyrite-arsenopyrite with gold/Au-As; 3 – quartz-pyrite-arsenopyrite-pyrrhotite/Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As); 4 – quartz-rutile-apatite-pyrite-pyrrhotite/Ba-Be-Zr-Ti-Y; 5–7 – zones of metasomatic halo: 5 – central; subzones a) polymetallic; b) arsenic; 6 – intermediate; 7 – front; 8 – host rocks

тиновый комплекс), окаймляет периферию минерализованной зоны. В промежуточной зоне метасоматического ореола распространена Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As) геохимическая ассоциация, обусловленная образованием кварц-пирит-арсенопирит-пирротитового комплекса, завершающего безрезитизацию. Отложение Au-As ассоциации происходило в более позднее время, с образованием арсенопирита в составе кварц-пирит-арсенопиритового с золотом минерального комплекса. Пространственное совмещение ореола мышьяка и золоторудной минерализации нарушается в краевых частях месторождения, в связи с чем использование мышьяка в качестве элемента-индикатора, в отдельных случаях, представляется затруднительным. Наиболее поздняя ассоциация Au-Ag-Pb-Zn-Cu полиметаллической с золотом стадии рудообразования (золото, галенит, сфалерит, халькопирит) приурочена к центральной части метасоматически измененных пород. Схожая картина геохимической зональности наблюдается и в других месторождениях [6, 25–28].

Характер распределения геохимических ассоциаций элементов позволил сделать вывод о концентрически-зональном строении геохимического поля месторождения, что выражено в закономерной смене последовательно формирующихся геохимических ассоциаций элементов и зон гидротермально-метасоматического ореола (от периферии к центру): Ba-Be-Zr-Ti-Y/фронтальная, Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As)/промежуточная, Au-As и Au-Ag-Pb-Zn-Cu/центральная.

## Выводы

Статистические параметры распределения элементов в первичных ореолах рассеяния месторождения Чертово Кoryто свидетельствуют об интенсивных гидротермально-метасоматических процессах, выразившихся в первую очередь в отложении высококонцентрированных растворов, содержащих Au, As, Ag, Pb.

В пределах месторождения среди элементов-спутников золотого оруденения наиболее контрастно распределено содержание As. Его первичный ореол существенно выходит за пределы контуров промышленного оруденения. Очевидно, это связано с процессами отложения ранних слабо золотоносных и более поздних высококонцентрированных золотоносных мышьяковистых растворов.

Основные рудные элементы – золото, мышьяк, серебро, свинец, цинк, медь, кобальт, никель – в объеме минерализованной зоны проявляют устойчивую корреляционную связь между собой.

Количественные показатели, отражающие интенсивность эпигенетических преобразований: энергия рудообразования, дисперсия и вариация геохимического спектра, выявляют объем, занимаемый рудной зоной.

С использованием кластер-анализа элементы объединились в следующие группы: 1) Au, As, B, Sr, P, Mo; 2) Ag, Zn, Pb; 3) Li, Co, Sn, Cu, Ni, Cr, V, Mn; 4) Ti, Y, Zr, Be, Ba. Методом К-средних проведено разделение проб на «породные» (5–7 кластеры) и «рудные» (1–4 кластеры), а также установлено зональное строение геохимического ореола месторождения.

Факторным анализом выделены Ba-Be-Zr-Ti-Y, Cr-Ni-Co-Cu-Mn-V-Sn-P и Ag-Pb-Zn геохимические ассоциации. Установленные ассоциации элементов согласуются со стадиями гидротермально-метасоматического минералообразования [18].

На основе созданной модели геохимической зональности установлено концентрически-зональное строение аномальной структуры геохимического поля месторождения. Ранняя Ba-Be-Zr-Ti-Y ассоциация элементов образуется в процессе их выщелачивания и переотложения на стадии кислотного метасоматоза и обрамляет крупнообъемный метасоматический ореол. Cr-Ni-Co-Cu-Mn-V-Sn-P(As) ассоциация элементов, образующаяся по завершении процесса березитизации, распространена в промежуточной зоне метасоматически измененных пород. Геохимические ассоциации продуктивных стадий оруденения Au-As и Au-Ag-Pb-Zn-Cu

занимают центральную часть метасоматического ореола.

Примененный комплекс методов обработки геохимической информации совместно с использованием данных минералого-геохимического картирования [18] обеспечил расшифровку аномальной структуры геохимического поля золоторудного месторождения Чертово Кoryто.

Установленную геохимическую зональность можно использовать на ранних стадиях геологического звездочного процесса как по первичным геохимическим ореолам, в том числе единичным горным выработкам и скважинам, так и по вторичным ореолам, с поправкой на подвижность элементов в процессе гипергенеза.

*Автор признателен В.Г. Ворошилову за ценные замечания и предложения, позволившие улучшить содержание статьи.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition // *Geoexploration*. – 1987. – V. 24. – P. 517–534.
- Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations // *Endeavour*. – 1990. – V. 14. – № 1. – P. 28–33.
- Nanoscale metals in Earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains / X. Wang, Z. Cheng, Y. Lu, L. Xu, X. Xie // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1997. – V. 58. – № 1 SPEC. – P. 63–72.
- Григоров С.А. Генезис и динамика формирования Наталкинского золоторудного месторождения по данным системного анализа геохимического поля // *Руды и металлы*. – 2006. – № 3. – С. 44–48.
- Григоров С.А. Основы структурной интерпретации геохимических полей рудных объектов для целей их локализации и оценки // *Отечественная геология*. – 2007. – № 4. – С. 45–52.
- 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.
- TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province, South China / X. Wei, J. Cao, R.F. Holub, P.K. Hopke, S. Zhao // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2013. – V. 128. – P. 124–135.
- Metal migration at the North Miitel Ni sulphide deposit in the southern Yilgarn Craton: P. 3. Gas and overview / R.R.P. Noble, M.J. Lintern, B. Townley, R.R. Anand, D.G. Gray, N. Reid // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2013. – V. 13. – № 2. – P. 99–113.
- Иванов А.И. Особенности применения традиционных методов поисков месторождений рудного золота в сложных горно-таежных ландшафтах // *Отечественная геология*. – 2013. – № 6. – С. 12–20.
- Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration / I.S. Sobolev, N.P. Bredikhin, T. Bratec, A.Y. Falk, O.S. Tolkachev, L.P. Rikhvanov, P.A. Tishin // *Applied Geochemistry*. – 2018. – V. 95. – P. 33–44.
- Variance-Correlation analysis in the exploration of hydrothermal (fluidogenous) deposits using surface gamma-ray spectrometry / I.S. Sobolev, A.N. Orekhov, T. Bratec, L.P. Rikhvanov, N.P. Soboleva // *Journal of Applied Geophysics*. – 2018. – V. 159. – P. 597–604.
- Синкина Е.А., Гаврилов Р.Ю. Объемная модель пирротиновой минерализации золоторудного месторождения Чертово Кoryто, Патомское нагорье // *Руды и металлы*. – 2018. – № 1. – С. 54–63.
- Иванов А.И. Опыт прогнозирования, поисков и оценки новых золоторудных месторождений в Бодайбинском рудном районе // *Отечественная геология*. – 2008. – № 6. – С. 11–16.
- Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 191 с.
- Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Кoryто (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.
- Структурно-динамическая модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч. 2. Месторождение Чертово Кoryто (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 23–38.
- Объемная геолого-геохимическая модель мезотермального золоторудного месторождения Чертово Кoryто (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.
- Вагина (Синкина) Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чертово Кoryто (Патомское нагорье) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 63–69.
- Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikial, Russia // *Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: 16<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016*. – Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016. Code 124231.
- 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.
- Reflectivity and microhardness of sulfide minerals as genetic information source (case study: Pyrite and arsenopyrite) / E.A. Sinkina, M.V. Korovkin, O.V. Savinova, A.A. Makarova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 33. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012053.

22. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых / под общ. ред. Н.И. Марочкина. – Л.: Недра, 1978. – 215 с.
23. Выборов С.Г., Быстров И.И. Опыт использования комплексного показателя нарушенности геохимического поля для прогнозирования оруденения // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 1990. – № 4. – С. 102–110.
24. Поцелуев А.А., Быстров И.И., Гаврилов Р.Ю. Показатели дисперсии и вариации геохимического спектра как критерии неоднородности геохимического поля // Прикладная геохимия: Сб. ст.: Прогноз и поиски. – М.: ИМГРЭ, 2002. – Вып. 3. – С. 419–428.
25. Плющев Е.В., Шатов В.В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. – Л.: Недра, 1985. – 247 с.
26. Чекваидзе В.Б., Милев С.А. Эндогенные ореолы сидерофильных элементов золоторудных месторождений // Руды и металлы. – 2009. – № 6. – С. 15–20.
27. Application of Multivariate Statistical Delineation of Prospective Geochemical Providenskaya Area (Chukotka, Russia) / M. Kirillova, V. Voroshilov, A. Yankovich, E. Yankovich, A. Maskov, A. Chernyshov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016 – V. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012012.
28. Identification of geochemical anomalies of the porphyry-Cu deposits using concentration gradient modelling: A case study, Jebel-Barez area, Iran / M. Ziaei, S. Safari, T. Timkin, V. Voroshilov, T. Yakich // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – V. 199. – P. 16–30.

*Поступила 18.02.2019 г.*

#### **Информация об авторах**

**Гаврилов Р.Ю.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDK 553.411.071:550.4

## ANOMALOUS GEOCHEMICAL FIELD OF THE CHERTOVO KORYTO GOLD DEPOSIT (LENSKY ORE DISTRICT)

**Roman Yu. Gavrilov,**

GavrilovRY@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to improve the efficiency of forecasting and prospecting for ore gold based on geochemical data.

**The aim** of the research is to develop a model of the anomalous structure of the geochemical field of the Chertovo Koryto deposit in order to identify additional predictive and search criteria for gold ore objects in carbon-carbonate-terrigenous strata.

**Methods:** statistical processing of geochemical data, geochemical modeling.

**Object:** the primary geochemical aureole of the Chertovo Koryto gold deposit.

**Results.** Statistical parameters of distribution of metals in a large-scale metasomatic aureole indicate intense hydrothermal-metasomatic processes, expressed, primarily, in deposition of highly concentrated solutions containing Au, As, Ag, Pb. Based on the processing of geochemical data on primary dispersion halos, a model of the geochemical zonality of the Chertovo Koryto gold deposit was created. The authors have established concentric-zonal composition of the anomalous structure of the deposit geochemical field. The early Ba-Be-Zr-Ti-Y association of elements leached and redeveloped during acid metasomatism (a quartz-rutile-pyrite-pyrrhotite complex) borders the periphery of the mineralized zone. In the intermediate zone of the metasomatic halo, the Cr-Ni-Co-Mn-V-Sn-P-(As) geochemical association is common, due to the formation of the quartz-pyrite-arsenopyrite-pyrrhotite complex completing the beresitization. The deposition of the Au-As association occurred at later time, with the formation of arsenopyrite in the composition of quartz-pyrite-arsenopyrite with the gold mineral complex. The latest association of the Au-Ag-Pb-Zn-Cu polymetallic with gold ore formation stage (gold, galena, sphalerite, chalcopyrite) is confined to the central part of metasomatically modified rocks. The complex of methods for processing geochemical information together with the use of the data of mineralogical and geochemical mapping provided the interpretation of the anomalous structure of the deposit geochemical field. The results obtained made it possible to supplement the existing understanding of the anomalous structure of the geochemical field of the Chertovo Koryto gold deposit.

### Key words:

Gold, Lensky ore district, anomalous structure of the geochemical field, geochemical zonality, mathematical statistics.

*The author is grateful to V.G. Voroshilov for valuable comments and suggestions to improve the content of the article.*

### REFERENCES

- Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition. *Geoexploration*, 1987, vol. 24, pp. 517–534.
- Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations. *Endeavour*, 1990, vol. 14, no. 1, pp. 28–33.
- Wang X., Cheng Z., Lu Y., Xu L., Xie X. Nanoscale metals in Earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terranes. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, vol. 58, no. 1 SPEC, pp. 63–72.
- Grigorov S.A. Genesis i dinamika formirovaniya Natalkinskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya po dannym sistemnogo analiza geokhimicheskogo polya [Genesis and dynamics of formation of the Natalkinsky gold field according to the system analysis of a geochemical field]. *Rudy i metally*, 2006, no. 3, pp. 44–48.
- Grigorov S.A. Fundamentals of structural interpretation of ore object geochemical fields for their localization and evaluation]. *Domestic geology*, 2007, vol. 4, pp. 45–52. In Rus.
- Voroshilov V.G. Anomaliye struktury geokhimicheskikh poley gidrotermalnykh mestorozhdeniy zolota: mekhanizm formirovaniya, metodika geometrizatsii, tipovye modeli, prognoz masshtabnosti orudneniya [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.
- Wei X., Cao J., Holub R.F., Hopke P.K., Zhao S. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, vol. 128, pp. 124–135.
- Noble R.R.P., Lintern M.J., Townley B., Anand R.R., Gray D.G., Reid N. Metal migration at the North Miitel Ni sulphide deposit in the southern Yilgarn Craton: Part 3, gas and overview. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 99–113.
- Ivanov A.I. Features of the application of traditional methods of prospecting ore gold deposits in complex mining and taiga landscapes. *Domestic geology*, 2013, no. 6, pp. 12–20. In Rus.
- Sobolev I.S., Bredikhin N.P., Bratec T., Falk A.Y., Tolkachev O.S., Rikhvanov L.P., Tishin P.A. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 95, pp. 33–44.
- Sobolev I.S., Orekhov A.N., Bratec T., Rikhvanov L.P., Soboleva N.P. Variance – Correlation analysis in the exploration of hydrothermal (fluidogenous) deposits using surface gamma-ray spectrometry. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, vol. 159, pp. 597–604.
- Sinkina E.A., Gavrilov R.Yu. Obemnaya model pirrotinovykh mineralizatsii zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto, Patomskoe nagore [Volumetric model of pyrrhotite mineralization in the Chertovo Koryto gold deposit, Patom upland]. *Rudy i metally*, 2018, no. 1, pp. 54–63.
- Ivanov A.I. Experience in forecasting, prospecting and evaluating new gold deposits in the Bodaibo ore district. *Domestic geology*, 2008, no. 6, pp. 11–16. In Rus.
- Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Instructions for geochemical methods of ore deposit exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 191 p.

15. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petro-geochemical characteristics of ore-hosting mesotomatic 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.
16. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Structural-dynamic model of gold deposits formed in the non-shale and black shale substrate. Part 2. Field Chertovo Koryto (Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 23–38. In Rus.
17. Gavrilov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. 3D geologic-geochemical model of mesothermal Chertovo Koryto gold-ore deposit (The Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 30–43. In Rus.
18. Vagina (Sinkina) 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.
19. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikalia, Russia. *Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: 16<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016*. Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016; Code 124231.
20. 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.
21. Sinkina E.A., Korovkin, M.V., Savinova, O.V., Makarova, A.A. Reflectivity and microhardness of sulfide minerals as genetic information source (case study: Pyrite and arsenopyrite). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012053.
22. Safronov N.I., Meshcheryakov S.S., Ivanov N.P. *Energiya rudoobrazovaniya i poiski poleznykh iskopaemykh* [Energy of mineralization and mineral exploration]. Ed. by N.I. Marochkina. Leningrad, Nedra Publ., 1978. 215 p.
23. Vyborov S.G., Bystrov I.I. Opyt ispolzovaniya kompleksnogo pokazatelya narushennosti geokhimicheskogo polya dlya prognozirovaniya orudneniya [Experience in using composite indicator of fracturing geochemical field to predict mineralization]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1990, no. 4, pp. 102–110.
24. Potseluev A.A., Bystrov I.I., Gavrilov R.Yu. Pokazately dispersii i variatsii geokhimicheskogo spektra kak kriterii neodnorodnosti geokhimicheskogo polya [Dispersion indicators and variations of the geochemical spectrum as criteria for heterogeneity of the geochemical field]. *Applied Geochemistry: Sat. Art.: Forecast and searches*. Moscow, IMGRE, 2002. Vol. 3, pp. 419–428.
25. Plyushchev E.V., Shatov V.V. *Geokhimiya i rudonosnost gidrotermalno-metasomaticheskikh obrazovaniy* [Geochemistry and ore potential of hydrothermal-metasomatic formations]. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 215 p.
26. Chekvaidze V.B., Milyaev S.A. Endogennye oreoly siderofilnykh elementov zolotorudnykh mestorozhdeniy [Endogenous halos of siderophilic elements of gold deposits]. *Rudy i metally*, 2009, no. 6, pp. 15–20.
27. Kirillova M., Voroshilov V., Yankovich A., Yankovich E., Maskov A., Chernyshov A. Application of Multivariate Statistical Delineation of Prospective Geochemical Providenskaya Area (Chukotka, Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012012.
28. Ziaii M., Safari S., Timkin T., Voroshilov V., Yakich T. Identification of geochemical anomalies of the porphyry-Cu deposits using concentration gradient modelling: a case study, Jebel-Barez area, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 199, pp. 16–30.

Received: 18 February 2019.

#### Information about the authors

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