

---

Журнал основан в 1992 г.

ISSN 0236-1493

# ГОРНЫЙ

ИНФОРМАЦИОННО-  
АНАЛИТИЧЕСКИЙ  
БЮЛЛЕТЕНЬ

*(НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ)*

MINING INFORMATIONAL  
AND ANALYTICAL  
BULLETIN

*(SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL)*

**ГОРНОЕ ДЕЛО В XXI ВЕКЕ:  
ТЕХНОЛОГИИ, НАУКА,  
ОБРАЗОВАНИЕ-2**



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«ГОРНАЯ КНИГА»

СПЕЦИАЛЬНЫЙ  
ВЫПУСК 60-2

**2015**

---

---

УДК 622  
ББК 33  
Г69

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253–03, утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (ОСТ 29.124–94). Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.60.953.Д.014367.12.14*

**Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование-2.**  
Г69 Материалы Международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 2. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). — 2015. — № 11 (специальный выпуск 60-2). — 648 с. — М.: Издательство «Горная книга».

ISSN 0236–1493 (в пер.)

В сборник включены доклады участников Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», состоявшейся 28–29 октября 2015 года и посвященной 110-летию горного факультета первого технического ВУЗа России – Национального минерально-сырьевого университета «Горный». Доклады были представлены на секциях: «Подземная разработка твердых полезных ископаемых»; «Открытые горные работы»; «Взрывное дело»; «Технологическая безопасность и горноспасательное дело»; «Аэрологическая безопасность»; «Горнопромышленная экология», а также круглых столов: «Развитие кадрового потенциала минерально-сырьевого комплекса» и «Развитие нормативно-правовой базы в области горного дела».

УДК 622  
ББК 33

ISSN 0236–1493

© Коллектив авторов, 2015  
© Издательство «Горная книга», 2015  
© Дизайн книги.  
Издательство «Горная книга», 2015

---

*Ю.В. Попов, Р.А. Цицуашвили*

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ФАКТОРЫ  
ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОДУКТОВ ОКИСЛЕНИЯ  
РУД В ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЕ БЕЛОРЕЧЕНСКОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАХОВСКОГО  
РУДНОГО УЗЛА (БОЛЬШОЙ КАВКАЗ)**

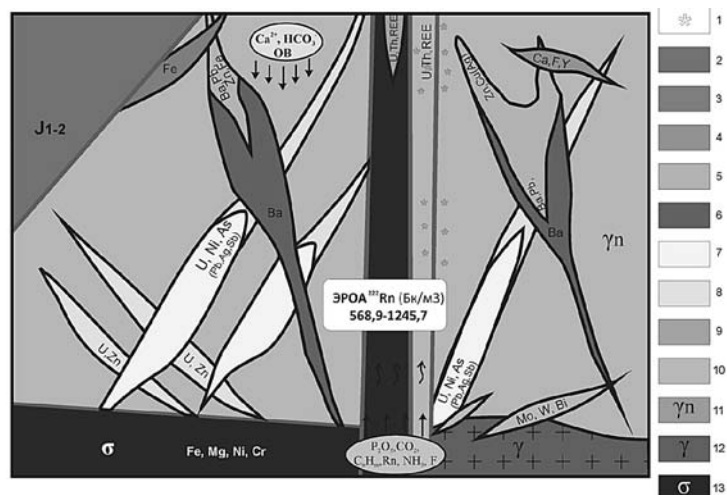
Рассмотрены процессы миграции продуктов дезинтеграции минерального вещества (радиоактивных элементов и тяжелых металлов) в природно-технической системе неэксплуатируемого месторождения. Приведены данные о минеральном составе рудных ассоциаций и вмещающих пород, выступающих в роле источника подвижных форм элементов (U, Th, Ni, As, Ag, Zn, Fe, Ba и др.). Изложены результаты обзорной оценки состояния горных выработок и прилегающих к ним природных ландшафтов. Выявлена миграция урана с гипергенными водами в зонах тектонических разломов (на основании измерения удельной активности  $^{226}\text{Ra}$ ), дифференцированный вынос продуктов дезинтеграции минерального вещества, поступающих в форме растворов и твердого стока с дренажными водами (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb) и водами, фильтрующимися через горные отвалы (Ti, V, Co), обнаружены эманации радона по зонам крупных разломов. Установлено концентрирование мигрирующих в подземных горных выработках продуктов гидролиза минералов на окислительном, щелочном карбонатном и сульфатном физико-химических барьерах; предполагаются несколько механизмов связывания элементов в устойчивые минеральные фазы: осаждение из водных растворов, изоморфное вхождение в ходе соосаждения, соосаждение в разных минеральных фазах, сорбирование с последующим разрушением комплексов сорбата и перераспределением металлов. Выявлены факторы, определяющие устойчивость природной среды к загрязнению, главное значение среди которых имеют гидрологический режим и состав пелитовой фракции илов и почв (характеризующихся почти полным отсутствием смектита).

*Ключевые слова:* природно-техническая система, микроминералы, геохимический барьер, тяжелые металлы, естественные радионуклиды.

**Л**иквидированные или законсервированные месторождения оказывают существенное воздействие на окружающую среду. Изучение состояния и механизмов самоорганизации

таких природно-технических систем создает эмпирическую базу для разработки методологии экологически безопасного закрытия рудников с учетом условий конкретного региона. К числу таких объектов, выступающих в роле природной лаборатории, принадлежат подземные горные выработки и прилегающие к ним природные ландшафты, локализованные в пределах Даховского рудного узла на Большом Кавказе в горной части Республики Адыгея. Рудный узел приурочен к поднятию герцинских кристаллических комплексов, ограниченному системами крупных разломов. На площади поднятия (~35 км<sup>2</sup>) известны рудопоявления вольфрама, молибдена, золота, никеля, уран-редкоземельной минерализации, а также неэксплуатируемые Даховское урановое и Белореченское баритовое месторождения. Последние образуют единый горно-рудный объект на флаге поднятия. К нижнему уровню вмещающего месторождения тектонического блока приурочено Даховское месторождение с уран-сульфидными рудами (ведущими минералами ассоциации выступают сфалерит и замещающий коффинит настуран) и более поздними уран-арсенидными рудами (никелин, настуран и антракосолит, образующие почковидные агрегаты, обрастающие сульфидами и арсенидами никеля). На завершающих стадиях формировалась арсенидно-антимонидная никелевая минерализация с самородным серебром и редкие жилы с самородным мышьяком и реальгаром. Белореченское месторождение, приуроченное к верхнему уровню, образовано баритовыми жилами. В баритовой массе присутствуют несколько генераций флюорита, галенит (с примесями Ag до 0,8%), сфалерит, халькопирит, пирит. Поздняя генерация баритовых жил несет непромышленную полиметаллическую минерализацию, приобретая галенит-баритовый с пиритом, сфалеритом и флюоритом состав. Завершают формирование месторождения маломощные флюоритовые, пирит-кальцитовые и марказит-кальцитовые жилы. Штольни вскрывают и дорудные кварцевые жилы с молибденитом, а также зоны рассеянной U-Th-REE минерализации, связанной с тонкими доломитовыми прожилками.

Даховское урановое месторождение разведано в 1962–1967 гг. бурением скважин с поверхности и проходной штолен на пяти разведочных горизонтах (на уровнях +985 м (штольня № 1),



**Рис. 1. Обобщенная модель геологического строения и минерального состава рудных объектов участка Белореченского месторождения.** Условные обозначения: 1 — рассеянная U-Th-REE минерализация; 2 — юрские осадочные толщи; 3 — пиритовые и марказитовые жилы; 4 — флюоритовые жилы; 5 — сульфидно-баритовые жилы; 6 — баритовые жилы; 7 — доломитовые жилы с уран-арсенидной минерализацией; 8 — доломитовые жилы с уран-сульфидной минерализацией; 9 — кальцитовые метасоматиты; 10 — жилы с молибденитом; 11 — гранитогнейсы; 12 — граниты; 13 — серпентиниты. Символами указаны главные элементы рудных ассоциаций

+956 м (шт. № 2), +895 м (шт. № 3), +777 м (шт. № 5), +684 м (шт. № 9)). В процессе разведки выявлены баритовые жилы, и в 1968- 1991 годах проводилась разведка Белореченского баритового месторождения, в ходе которой пройдены дополнительные горные выработки. Подземные горные выработки вскрывают минеральные ассоциации разных этапов и стадий, потенциально выступающие в качестве источника широко спектра подвижных форм элементов (рис. 1).

К настоящему времени произошло самозатопление подземных горных выработок, входы в большинство штолен завалены. Горные отвалы нестабильны; осыпям и оползневым подвижкам способствует подмыв прирусловых частей, а также сейсмическая активность (землетрясения с магнитудой 3–3,5 балла зафиксированы в 1994 г. и 2004 г.). Обследование территории в целом указывает на восстановление природных ландшафтов: на

деградированных участках дубового леса сформировались серо-ольшаники (с грабом обыкновенным, буком восточным, липой кавказской) — кратковременные производные сообщества, в дальнейшем сменяемые коренными лесными породами. Анализ атмосферы штолен указывает на эманации радона в зонах тектонических разломов: эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА)  $^{222}\text{Rn}$  в штольне № 2 составляет 568,9–863,2 ( $\pm 20\%$ ) Бк/м<sup>3</sup>, в штольне № 3 — 856,4–1245,7 ( $\pm 20\%$ ) Бк/м<sup>3</sup>. Мощность эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения пород стен штолен № 2 и № 3 составляет 0,52–1,03 мкЗв/ч. Удельная активность  $^{238}\text{U}$  при этом составляет 37,0–269,1 ( $\pm 18\%$ ) Бк/кг,  $^{226}\text{Ra}$  37,3–194,8 ( $\pm 18\%$ ) Бк/кг,  $^{232}\text{Th}$  — 12,5–79,0 ( $\pm 18\%$ ) Бк/кг. Значение удельной активности  $^{226}\text{Ra}$  в аргиллитах зоны тектонического контакта с кристаллическими породами в забое штольни №3 составляет ~38 Бк/кг при фоновых для аргиллитов участка значениях 17–28 Бк/кг, что указывает на миграцию соединений урана с гипергенными растворами. Фоновые значения МЭД гамма-излучения в породах отвалов не превышают значений для фоновых пород участка, а эффективная активность —  $A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,3A_{\text{Th}} + 0,09A_{\text{K}}$  (НРБ-99/2009) — в основном, соответствует I классу материалов. Рекогносцировочное опробование иловых осадков в штольне № 3 близ приустьевой в разные сезоны 2014 г. выявило существенные сезонные вариации удельной активности естественных радионуклидов ( $^{226}\text{Ra}$   $83.2 \pm 7.6$  —  $407.9 \pm 27.3$  Бк/кг,  $^{232}\text{Th}$   $24.5 \pm 1.8$  —  $61.8 \pm 4.2$  Бк/кг) [5] и тяжелых металлов [6]. Опробование донных иловых отложений дренажа штолен и водотоков бассейна р. Сюк выявляет, что с поступающим из штольни иловым материалом связаны повышенные концентрации валовых содержаний типичных для рудных ассоциаций элементов (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb), а с поступающим из отвалов в бортах ручьев — продуктов гидролиза силикатов и рассеянной в них минерализации ( $\text{TiO}_2$ , V, Co) и обычных для отвалов обломков из галенит-баритовых жил (Pb).

Наиболее высокие содержания большинства элементов и значения удельной активности  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  в илах фиксируются у подножия слагающих борта отвалов и на участках выполаживания долины ниже по течению от штолен Белореченского месторождения, где уклоны русла снижаются до 5–7°

и отмечается накопление инстративного аллювия мощностью до 2,0–2,5 м. При этом гидродинамический режим р. Сюк приводит к периодическому «промыванию» долины, что дает основание рассматривать выложенные участки, как области краткосрочного концентрирования (преимущественно в составе псаммитовых и алевритовых фракций). Аллювиально-дерновые почвы, формирующиеся на террасах приустьевой части долин р. Сюк не обнаруживают значимо превышающих фоновые значения для почвоподстилающих пород концентрации тяжелых металлов (в частности для Pb содержание составляет 0,003–0,004% при фоновых значениях в подстилающей аргиллитовой толще 0,0027–0,011% для разных пачек). Не выявляется и превышения удельной активности  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ : по данным наблюдений 2010–2013 гг. для  $^{226}\text{Ra}$  значения укладываются в интервал ~15–20 Бк/кг, для  $^{232}\text{Th}$  ~23–34 Бк/кг [5]. Глинистая фракция илов и почв (по результатам рентгенофазового анализа) имеет хлорит-каолинит-гидроалюминистый состав (при почти полном отсутствии смектита и содержании смешанослойных слюда-смектитов не выше 5–10%), что не способствует закреплению гумусового вещества [1, 4], связывающего металлы в металлорганические соединения [3].

В доступных для изучения штольнях главным источниками подвижных форм соединений металлов выступают сульфиды пиритовых и галенит-баритовых жил. Поступающие в штольни инфильтрационные слабокислые (рН ~5,5) сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые воды, реагируя с сульфидными жилами, образуют зоны интенсивного окисления, выступающие источником кислых сульфатных растворов, насыщенных металлами. На поверхности окисляющегося пирита при этом отмечаются микрофазы сернистого серебра (по составу близкого к акантиту), а среди мелантерита — редкие микрофазы самородного серебра. Распределение микроминеральных фаз эмпирически подтверждает физико-химическую модель окислительного растворения серебросодержащих сульфидов, описывающую переаспределение серебра, обуславливаемое градиентом Eh-рН, возникающим между поверхностью сульфида и гипергенными водами [2]). Вокруг зерен галенита формируются оторочки англезита, водных сульфатов свинца, глётта-массикота, в полиминеральных ассоциациях — и водных оксидов меди. При-

мечательным является отсутствие среди продуктов окисления галенита микрофаз соединений серебра (при том, что в составе минерала изоморфная примесь серебра составляет до 0,8%). Это может объясняться экспериментально установленными данными об осаждающей способности сульфидов по отношению к серебру: сульфиды выстраиваются в ряд  $\text{FeS}_2$ - $\text{ZnS}$ - $\text{PbS}$  по убыванию их осаждающей способности (в случае равных концентраций тяжелых металлов в растворах) [2].

Выходы кислых вод, поступающих из зон окисления сульфидных жил, тассируются участками образования гидроксидов железа на стенках и сводах штолен. Этот окислительный физико-химический барьер представляет собой динамичную систему, меняющуюся в зависимости от характера фильтрации. Микрофазы соединений металлов в гидроксидных образованиях представлены соединениями серебра, способного активно мигрировать в виде комплексного иона в кислых и щелочных водах окислительной обстановки [2]. Следовые содержания целого спектра металлов (Mn, Zn, Cu, Pb), не образующих самостоятельных фаз, указывают на их сорбирование на поверхности гидроксидов железа. В силу нестабильности условий процессы связывания тяжелых металлов в труднорастворимые соли имеют здесь ограниченное распространение.

Участки современного карбонатного минералообразования представлены натечными агрегатами на сводах и стенках горных выработок, образующими небольшие сталактиты и местами покрывая стенки выработок сплошными натёками мощностью до 1 см в зонах поступления гипергенных вод со слабощелочным значением pH. По данным рентгенофазового анализа карбонат представлен кальцитом. Термический анализ выявляет экзотермический эффект, связанный с кристаллизацией аморфного карбоната. Натечные агрегаты состоят из микрокристаллической массы кальцита, пронизанной капиллярами, выполненными ещё более тонкокристаллическим, вплоть до аморфного, агрегатом. Строение агрегатов зональное, обусловленное нарастанием зон различной плотности, местами содержащих глинистые компоненты. Химический состав зон существенно не меняется, типичными примесями являются магний (~0,5 мас.%), стронций (~0,2%), цинк (~0,1%). С карбонатными агрегатами парагенетически связан ряд минералов тяжелых металлов, образующих



обильные микрофазы размером преимущественно до 5 мкм. На поверхности натечных образований, формирующихся на стенках и сводах горных выработок, отмечаются гидроксиды железа, кальцийсодержащий барит, церуссит, смитсонит, недиагностируемые уверенно методами электронно-зондового микроанализа соединения цинка, серебра и свинца (преимущественно в форме сульфатных и карбонатных соединений, а также единичные сульфиды).

Присутствие на небольших участках (~1–2 см<sup>2</sup>) одновременно сульфидных, сульфатных и карбонатных соединений дает основание предполагать неустойчивость и активные реакционные преобразования микрофаз. Нестабильность соединений, в первую очередь сульфидных и сульфатных, приводит к подвижности катионов металлов, переходящих в раствор и частично сорбируемых карбонатом кальция ( $\text{>CO}_3\text{H}^0 + \text{Me}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{CO}_3\text{Me}^+ + \text{H}^+(\text{aq})$ ) в соответствии с хорошо изученными механизмами [7]. Катионы двухвалентных металлов с ионным радиусом меньше, чем у кальция, как известно, интенсивно сорбируются кальцитом (в том числе, согласно экспериментальным данным, при параметрах среды, близких карбонатообразованию в белореченских штольнях — рН 7–8, Т 25 °С [8]), образуя твердые растворы в кальците. Это объясняет избирательное связывание цинка, отмечающегося в виде изоморфной примеси в кальците. Крупные катионы (такие как барий, свинец) способны встраиваться в решетку ромбического арагонита (но не кальцита) [7], что объясняет обособление во внутренних зонах карбонатных агрегатов самостоятельных микрофаз церуссита, бариевого кальцита, бариокальцита. Можно полагать, процессы карбонатообразования определяют как изоморфное вхождение в ходе кристаллизации (для Mg, Sr), так и соосаждение в микроминеральных фазах (для Zn, Pb, Cu, Ag) с последующим разрушением микроминеральных фаз и перераспределением металлов, контролируемым сорбционными механизмами. Среди мигрирующих в водных растворах тяжелых металлов наиболее эффективно связываются в минеральные фазы цинк (входя в кальцит в виде изоморфной примеси) и серебро (на поверхности кальцита).

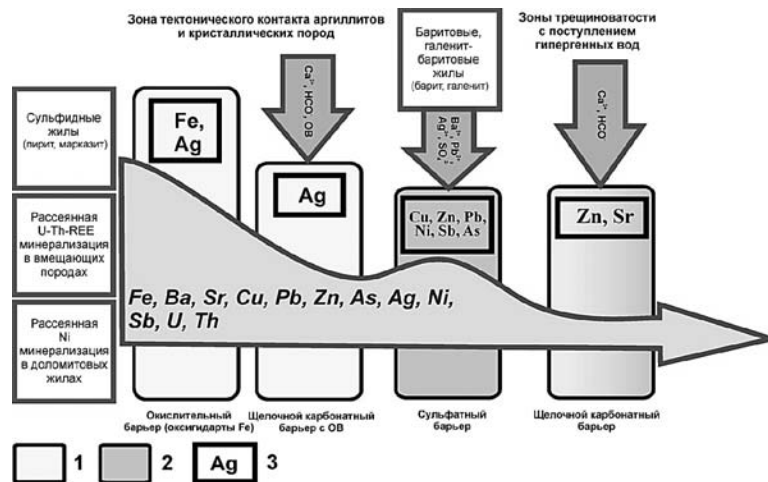
Участки окисления сульфидно-баритовых ассоциаций приурочены к поверхностям, микротрещинам и полостям баритовых жил, где образуются небольшие по мощности ореолы в усло-

виях сульфатного физико-химического барьера. Среди сульфатов наиболее распространен гипс, обычно ассоциирующий с сульфатами меди — брошантитом, серпьеритом и девиллином (содержащим 0,4–1,4 мас.% никеля), часто — с ярозитом-плюмбоярозитом, гемиморфитом, брошантитом, мелантеритом. Микроминеральный парагенезис указывает на формирование стабильных фаз сульфатов за счет реакций ионного обмена с участием широко спектра элементов (Cu, Zn, Pb, Ni, Sb, As). Характерно эффективное связывание свинца — высокотоксичного элемента, способного активно мигрировать в форме прочных гидроксильных и карбонатных комплексов — в англезите, плюмбоярозите и других минеральных фазах.

В целом, фазовый и химический состав образующихся в подземных выработках минеральных образований, включая микроминеральные фазы, дает основание полагать сочетание нескольких механизмов связывания мигрирующих элементов в устойчивые минеральные фазы. Обобщенная схема, отражающая источники элементов, физико-химические барьеры, приводящие к их селективной концентрации и преобладающие механизмы связывания в устойчивые минеральные фазы приведена на рис. 2.

**Заключение.** Природно-техническая система Белореченского месторождения выявляет воздействие основных факторов, управляющих распределением продуктов выноса минерального вещества в условиях горной лесной зоне Адыгеи и сходных территорий Северо-Западного Кавказа. Установлено, что вклад в формирование геохимической специфики потока рассеяния месторождения вносят не только рудные ассоциации, но и дезинтегрированные породы отвалов, характеризующиеся своеобразным набором поставляемых элементов.

Мигрирующие в подземных горных выработках продукты окисления минерального вещества дифференцированно осаждаются на естественных физико-химических барьерах, главными среди которых выступают: щелочной, приуроченный к зоне современного карбонатообразования, сульфатный, формирующийся в зонах окисления баритовых жил, и окислительный в зонах формирования гидроксидов железа за счет кислых растворов, поступающих из участков концентрации сульфидных руд. Каждый из барьеров выделяется специфичным комплексом микроминеральных фаз, концентрирующих металлы в виде



**Рис. 2. Источники и физико-химические барьеры концентрации элементов в природно-технической системе горных выработок Белореченского месторождения.** Условные обозначения: 1 — барьеры с преимущественно сорбционным механизмом концентрирования; 2 — барьеры с преимущественно микроминеральной формой концентрирования; 3 — элементы, осаждаемые в составе стабильных минеральных фаз

соединений разной степени стабильности. Состав микроминеральных ассоциаций, соответствующих опубликованным разным авторами экспериментальным данным, позволяет предполагать несколько механизмов связывания элементов в устойчивые минеральные фазы: осаждение из водных растворов, изоморфное вхождение в ходе соосаждения, соосаждение в разных минеральных фазах, сорбирование с последующим разрушением комплексов сорбата и перераспределением металлов.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности проекта № 5.1848.2014.5/К.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева Т.В. Связь между минералогическим составом и свойствами поверхности почв / Т.В. Алексеева, А.О., Алексеев, З. Соколовска, М. Хайнос // Почвоведение. — 1999. — № 5. — С. 604–613.
2. Гаськова О.Л. Разработка физико-химической модели окислительного растворения золото- и серебросодержащих сульфидов в природных

рудах и техногенных отвалах сульфидных месторождений / О.Л. Гаськова, Е.П. Бортникова, К.Г. Моргунов, А.М. Плюснин // Информационный бюллетень РФФИ. — 1996. — № 4.

3. *Добровольский В.В.* Гуминовые кислоты и водная миграция тяжелых металлов // Почвоведение. — 2006. — № 11. — С. 1315–1321.

4. *Курочкина Г.Н., Пинский Д.Л.* Образование минералоорганических соединений и их влияние на поверхностные свойства почвенных алюмосиликатов // Почвоведение. — 2004. — № 4. — С. 441–451.

5. *Попов Ю.В.*  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  в породах и донных отложениях территории Белореченского месторождения (Большой Кавказ) / Попов Ю.В., Бураева Е.А., Нефедов В.С., Дергачева Е.В., Гончаренко А.А., Цицуашвили Р.А. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2015. — № 3. — С. 226–229.

6. *Попов Ю.В., Бураева Е.А., Цицуашвили Р.А.* Закономерности распределения валовых содержаний металлов в донных отложениях территории Белореченского месторождения (Большой Кавказ, Адыгея) // Успехи современного естествознания. — 2014. — № 12 (5). — С. 577–581.

7. *Mielczarski J.A.* Surface Speciation of Dolomite and Calcite in Aqueous Solutions / J.A. Mielczarski, J. Scott, O.S. Pokrovsky // Encyclopedia of Surface and Colloid Science. Ed. A. Hubbard. — 2006. — P. 5965–5978.

8. *Zachara J.M., Cowan C.E., Resch C.T.* Sorption of divalent metals on calcite / J.M. Zachara, C.E. Cowan, C.T. Resch // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1991. — Vol. 60 (4). — P. 727–731.

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

---

*Попов Юрий Витальевич* — канд. геол.-минер. наук, Южный федеральный университет, e-mail: popov@sfedu.ru

*Цицуашвили Рубен Артурович* — инженер, Южный федеральный университет, e-mail: racic@sfedu.ru



UDC 550.424.6

### **REGULARITIES AND FACTORS OF OXIDATION PRODUCTS LOCALIZATION IN NATURAL-ANTHROPOGENIC SYSTEMS OF MINE WORKING OF THE DAHOVSKY ORE JUNCTION (THE GREATER CAUCASUS)**

*Popov Yury V.*, Candidate of Geology and Mineralogy Sciences, Southern Federal University, e-mail: popov@sfedu.ru

*Tsitsuashvili Ruben A.*, Engineer, Southern Federal University, e-mail: racic@sfedu.ru