

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СИСТЕМЕ БЕЛОРЕЧЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (БОЛЬШОЙ КАВКАЗ)

Попов Ю.В.¹, Бураева Е.А.², Ермолаева О.Ю.³, Гончарова Л.Ю.³, Цицуашвили Р.А.¹

¹Институт наук о Земле Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия (344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40), e-mail: popov@sfedu.ru

²Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия (344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194), e-mail: buraeva_elen@mail.ru

³Факультет биологических наук Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия (344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Стачки, 194/1), e-mail: oyerbolaeva@sfedu.ru

Изучены закономерности распределения естественных радионуклидов в породах Белореченского месторождения, породных отвалах и в почвах прилегающих ландшафтов, охарактеризованы микроминеральные ассоциации зон окисления сульфидных и баритовых руд, окислительного, щелочного карбонатного и сульфатного физико-химических барьеров. Установлено дифференцированное осаждение тяжелых металлов на естественных барьерах в природно-техногенной системе подземных горных выработок, выявлены процессы связывания металлов в минеральные фазы (соосаждение в разных фазах, изоморфное вхождение, сорбирование). Признаков концентрирования естественных радионуклидов в почвах не выявлено; накопление ²²⁶Ra в дерновом горизонте аллювиально-дерновой почвы определяется особенностями почвообразования, климатическими условиями и свойствами самой почвы. Установлен высокий нейтрализующий потенциал природной среды.

Ключевые слова: тяжелые металлы, естественные радионуклиды, геохимические барьеры, микроминералы, почва, ландшафт, породы.

REGULARITIES OF NATURAL RADIONUCLIDES AND HEAVY METALS DISTRIBUTION IN ENVIRONMENTAL-TECHNOGENIC SYSTEM OF THE BELORECHENSKOE DEPOSIT (GREAT CAUCASUS)

Popov Y.V.¹, Buraeva E.A.², Ermolaeva O.Y.³, Goncharova L.Y.³, Tsitsuashvili R.A.¹

¹Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia (40 Zorge St., Rostov-on-Don, Russia 344090), e-mail: popov@sfedu.ru

²Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia (194 Stachka Av., Rostov-on-Don, Russia 344090), e-mail: buraeva_elen@mail.ru

³Faculty of biological sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia (194/1 Stachka Av., Rostov-on-Don, Russia 344090), e-mail: oyerbolaeva@sfedu.ru

Results of study of regularities of the distribution of natural radionuclides in rocks of Belorechenskoye deposit, waste dumps and soils of adjacent landscapes are presented. Micro mineral associations of sulphide and barite ores' oxidation zones, oxidative, alkaline-carbonate and sulfate physicochemical barriers are characterized. Differential deposition of heavy metals in natural barriers within environmental-technogenic system in underground mine workings; binding of metals in the mineral phase (co-precipitation in different phases, isomorphic inclusion, sorption) are identified. Signs of concentration of natural radionuclides in soils have not been identified. It is found that features of soil-forming processes, climatic conditions and the properties of the soil determine ²²⁶Ra accumulation in turf horizon of alluvial-soddy soil. High neutralizing capacity of the natural environment has been identified.

Keywords: heavy metals, natural radionuclides, geochemical barriers, trace minerals, soil, landscape.

Природно-техногенные системы горных выработок интересны в отношении выявления закономерностей миграции металлов, выступающих в роли загрязнителей природной среды, и их влияния на природные ландшафты. Построение моделей, адекватно описывающих протекающие при этом процессы и эффективных при разработке природоохранных

технологий, требует привлечения эмпирических данных, отражающих влияние сложности компонентного состава системы и изменения параметров среды на протяжении длительных промежутков времени. Привлекательным в этом плане объектом служат горные выработки неэксплуатируемого Белореченского месторождения, расположенного в горной части республики Адыгея (на правом притоке р. Белой – р. Сюк, в 8 км к югу от станицы Даховская) на фланге Даховского кристаллического поднятия.

Объекты и методы их исследования. Белореченское месторождение образует верхний уровень сложного горно-рудного объекта, нижние горизонты которого соответствуют Даховскому урановому месторождению (с уран-сульфидной и уран-арсенидной минерализацией в доломитовых жилах и линзах). Рудные тела Белореченского месторождения представлены жилами барита (содержит примеси Sr (до 0,2-5%), Ca (до 0,5%) и Pb (до 0,1%)), в массе барита присутствуют несколько генераций флюорита, галенит (с примесями Ag до 0,8%), сфалерит, халькопирит, пирит [1]. Поздняя генерация баритовых жил несет непромышленную полиметаллическую минерализацию, приобретая галенит-баритовый с флюоритом состав. Завершили формирование месторождения пирит-кальцитовые и марказит-кальцитовые жилы. Основная часть оруденелых жил локализована в гнейсах и гранито-гнейсах, развитых между герцинскими гранитами и меланократовой амфиболитово-гнейсовой толщей. Тектонический блок, вмещающий месторождения, по разломам граничит с подстилающими серпентинитами и перекрывающими юрскими аргиллитами. Широкое развитие трещин разного порядка, определяемое приуроченностью к зоне крупного длительно развивавшегося Центрального разлома [2], обеспечивает как проницаемость для глубинных флюидов [4], так и интенсивную циркуляцию гипергенных растворов.

Система подземных горных выработок (значительная часть которых незаконсервирована) пройдена в кристаллических породах (местами вскрывая зоны контакта с аргиллитами) в 1960-1980-х годах. В период активных горных работ у створов штолен на склонах рек и ручьев образованы щебеночно-глыбовые отвалы, техногенная нагрузка привела к деградации прилегающих участков леса.

Техногенные ландшафты расположены в лесной зоне с преобладанием дубовых лесов. На освещенных и более увлажненных склонах южной, юго-восточной и юго-западной экспозиции верхней части левого склона долины р. Сюк распространен дубняк кизилковый с преобладанием дуба скального (*Quercus petraea*) с незначительной примесью дуба грузинского (*Q. ibérica*), образующий первый древесный ярус. В небольшой примеси к дубу постоянно встречается рябина глоговина (*Sorbus torminalis*) и клен красивый (*Acer laetum*), достигающие высоты второго яруса. В кустарниковом ярусе преобладает кизил (*Cornus mas*)

с примесью боярышника (*Crataegus pentagina*) и единичными экземплярами свидины южной (*Thelycrania australis*). В верхней части правого склона долины р. Сюк, по террасам и пологим затененным склонам распространены леса с господством дуба Гартвиса (*Q. hartwissiana*). Этот тип леса, как правило, растет небольшими массивами со смешанным древостоем. Кроме дуба Гартвиса, в этих древостоях значительное участие принимает граб (*Carpinus betulus*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), ясень (*Fraxinus excelsior*), липа кавказская (*Tilia caucasica*), груша кавказская (*Pyrus caucasica*). Почти всегда хорошо выражен кустарниковый ярус, представленный кизилом (*Cornus mas*) и боярышником (*Crataegus pentagina*). Фрагментарно отмечаются участки грабового леса с большой густотой древостоя и степенью сомкнутости крон, в которых кустарниковый ярус практически отсутствует - встречаются лишь отдельные взрослые экземпляры кустарников и немногочисленный кустарниковый подрост лещины (*Corylus avellana*), боярышника (*Crataegus pentagina*), свидины (*Telycrania australis*), калины (*Viburnum opulus*), азалии (*Rhododendron luteum*). На крутых сухих скальных склонах с маломощными почвами, в том числе на некоторых участках близ штолен и их отвалов, распространены дубовые леса с примесью сосны крючковатой (*Pinus hamata*); на относительно пологих участках рельефа преобладает дуб скальный, на более крутых - сосна. Редко встречаются граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), бук восточный (*Fagus orientalis*), липа кавказская (*Tilia caucasica*), в кустарниковом ярусе преобладает азалия (*Rhododendron luteum*).

На деградированных территориях, включая участки отвалов штолен, сформировались сероольшаники – легко занимающие освободившиеся территории кратковременные производные сообщества, в дальнейшем сменяемые коренными лесными породами. Кроме ольхи серой (*Alnus incana*), в составе сообществ встречается граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), бук восточный (*Fagus orientalis*), липа кавказская (*Tilia caucasica*), редко - мушмула германская (*Mespilus germanica*). В кустарниковом ярусе присутствует подрост боярышника (*Crataegus pentagina*), свидины (*Telycrania australis*), калины (*Viburnum opulus*), азалии (*Rhododendron luteum*).

Почвы, преобладающие в районе региона исследования (на левом берегу реки Сюк) – бурые лесные ненасыщенные и аллювиально-дерновые. Почвенные образцы отбирали по генетическим горизонтам и послойно, слоями 0-1, 1-3, 3-5, 5-10, 10-15, 15-25, 25-35 см и далее – слоями по 10 см - до почвообразующей породы. Отобранные образцы почвы высушивали при температуре 100-105 °С, измельчали до размера частиц не более 0,06 мм, герметично упаковывали в счетные геометрии, выдерживали в течение 14-20 суток для наступления радиоактивного равновесия в ряду ^{226}Ra - ^{222}Rn .

Удельную активность естественных радионуклидов (ЕРН) в образцах почвы и породах определяли инструментальным гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа. Использовали спектрометр гамма-излучения с GeHP-детектором с эффективностью 25% в диапазоне 30-1500кэВ, отношением пик/комpton 51,7:1 (модель 7229N-7500sl-2520, фирмы Canberra) и набор счетных геометрий «Маринелли 1,0 л», «Маринелли 0,5 л», «Дента 0,02 л» (диск высотой $h=7$ мм, диаметром 63 мм). Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) определяли поисковыми дозиметрами-радиометрами СРП-88н, ДРБП-03, ДКС-96.

Состав минеральных ассоциаций определялся комплексом методов, включающих растровую электронную микроскопию и рентгенофлуоресцентный микроанализ (микроскоп VEGA II LMU (фирмы Tescan) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT), дифракционные методы (прибор «ДРОН-7») и дифференциальный термический анализ (прибор STA 449 C Jupiter фирмы Netzsch). Комплекс исследований выполнен на базе лабораторий «Центра исследований минерального сырья и состояния окружающей среды» Южного федерального университета.

Распределение естественных радионуклидов в породах и почвах. В пределах Даховского поднятия распределение МЭД и удельной активности естественных радионуклидов (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) обусловлено двумя главными факторами: эволюцией флюидной системы, сопряженной с очагом позднегерцинских субщелочных калиевых гранитов, и флюидной системой, контролируемой Центральным разломом и занимающими аналогичную структурную позицию крупными разломами северо-западной ориентировки [3]. Площадной метасоматоз сопровождался перераспределением радионуклидов, не приводя к их локальным концентрациям. Модальные значения МЭД гамма-излучения для типичных продуктов щелочной стадии метасоматоза - интенсивно микроклинизированных гранитов – составляют 0,20-0,30 мкЗв/ч (при этом удельная активность ^{40}K достигает 1521 Бк/кг); для продуктов последующей кислотной стадии – грейзенизированных гранитов – значения составляют 0,20-0,48 мкЗв/ч (удельная активность ^{40}K до 1770 Бк/кг). Вмещающие Белореченское месторождение калишпатизированные и мусковитизированные гнейсы характеризуются значениями МЭД до 0,30-0,40 мкЗв/час, повышающимися в штольнях (измерения выполнены в штольнях № 2 и № 3) до 0,5-1,0 мкЗв/час, а на аномальных участках в штольне № 2 – до 2,68 мкЗв/час (при величине фона 1,42 мкЗв/час). Спецификой отличаются присутствующие в зоне Центрального разлома тектонические линзы кальциевых метасоматитов, отличающиеся повышенными значениями МЭД гамма-излучения (0,30-0,62 мкЗв/час), удельной активности ^{226}Ra и ^{232}Th и присутствием уран-торий-редкоземельной минеральной ассоциации [4]. Максимальные значения гамма-излучения связаны с

доломитовыми жилами Даховского месторождения, несущими коффинит-сфалеритовую и коффинит-никелиновую минеральные ассоциации (в которых коффинит замещён настураном).

Непосредственно в подземных горных выработках Белореченского месторождения значения МЭД гамма-излучения и удельной активности ЕРН (таблица 1) существенно варьируют в зависимости от состава пород (и степени их насыщенности нитевидными гидротермальными карбонатными прожилками с рассеянной урановой минерализацией) и близости к зонам тектонических разломов, по которым поступает радон. Так, эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) ^{222}Rn в штольне № 2 составляет 568,9-863,2 Бк/м³ ($\pm 20\%$), в штольне № 3 – 856,4-1245,7 ($\pm 20\%$) Бк/м³, при этом максимальные значения отмечаются в зонах тектонической трещиноватости.

Таблица 1. МЭД гамма-излучения и удельная активность ЕРН в породах горных выработок Белореченского месторождения

Точки измерений (от створа)	МЭД, мкЗв/час		Удельная активность, Бк/кг. Погрешность $\leq 18\%$				
	фон	порода	^{238}U	^{226}Ra	^{224}Ra	^{232}Th	^{40}K
Штольня № 2							
4 (200 м)	0,51	0,52	97,3	94,5	56,3	52,3	931,9
6 (300 м)	0,80	0,91	192,4	194,8	44,5	42,8	376,1
7 (350 м)	0,81	0,91	269,1	263,5	45,2	43,9	506,9
Штольня № 3							
0	0,19	0,22	61,5	59,1	65,8	56,2	765,1
12 (600 м)	0,64	0,57	107,5	109,3	54,8	55,5	707,0
13 (650 м)	0,95	1,03	208,1	194,1	87,7	79,0	912,5
18 (900 м)	1,04	1,01	37,0	37,3	11,4	12,5	250,5

Фоновые значения МЭД гамма-излучения в породах отвалов не превышают значений для фоновых пород участка (за исключением редких аномальных образцов с урановой минерализацией), 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.

В почвах закономерности распределения ЕРН изучены гипсометрически ниже месторождения, на левобережье р. Сюк (в зоне вероятного потока рассеяния Даховского месторождения). Почвенный покров исследуемого участка является сложным и представлен различными типами почв. На склонах на элювии аргиллитов распространены примитивные и неполноразвитые ненасыщенные бурые лесные почвы. На выровненной верхней части

склонов развиты полнопрофильные бурые лесные ненасыщенные почвы на желто-бурых глинах. В основании склона в пойме реки Сюк сформированы ненасыщенные аллювиально-дерновые почвы на аллювиально-делювиальных отложениях.

Во всех горизонтах почв удельная активность ^{226}Ra и ^{232}Th ЕРН не превышает средних значений для почв территории Даховского поднятия (24,8 Бк/кг для ^{226}Ra и 31,0 Бк/кг для ^{232}Th). Повышенным накоплением ^{226}Ra характеризуются слои 0-1 см и 1-3 см дернового горизонта Ad в аллювиально-дерновых почвах, приуроченных к пойме р. Сюк (таблица 2). Данные многолетних наблюдений (в летние периоды 2009-2013 гг.) выявляют для этих слоёв и значительные вариации значений удельной активности ^{226}Ra (19 – 26,9 Бк/кг).

Таблица 2. Удельная активность ^{226}Ra и химические особенности состава верхних горизонтов почв

Горизонт	Глубина, см	Ауд., Бк/кг	Поглощенные катионы, мг/экв. на 100 г почвы		рН	Гумус, %	P ₂ O ₅ , % вес.
			Ca ²⁺	Mg ²⁺			
Верхняя часть склона. Бурая лесная ненасыщенная малогумусная среднесуглинистая (обр. СС-4)							
Ad	0-1	15.1	5,00	10,00	6,56	4,07	0,07
	1-3	18.3					
	3-5	20.7					
A	5-10	26.0	3,16	7,37	6,79	2,57	0,07
	10-15	22.1					
	15-25	20.4					
Пойма р. Сюк. Аллювиально-дерновая ненасыщенная среднесуглинистая (обр. СС-6)							
Ad	0-1	42.4	10,50	9,47	6,20	7,7	0,19
	1-3	37.2					
	3-5	13.0					
A	5-10	15.1	7,50	20,00	6,80	5,4	0,16
	10-15	7.2					
	15-25	7.9					

Верхний дерновый горизонт аллювиально-дерновой почвы характеризуется относительно высоким содержанием гумуса – 7,7% (таблица 2). Подвижность урана (и, как следствие, вариации активности дочернего ^{226}Ra) может объясняться как значением рН~6,2, определяющим вероятность образования миграционноспособных комплексных соединений, так и резкими изменениями параметров среды в условиях активного гидродинамического режима р. Сюк. Роль глинистых компонентов, обладающих высокой величиной удельной сорбирующей поверхности и возможностью катионного обмена, относительно невелика. Преобладающая часть почвообразующего пелитового материала поступает за счет аллювиального и делювиального привноса продуктов размыва слагающих борта долины аргиллитов, а в составе последних доля смектита (по данным рентгеноструктурных

исследований) не превышает 7-8%. В целом признаков концентрирования ЕРН в почвах не выявлено.

Минералого-геохимические закономерности концентрирования тяжелых металлов на геохимических барьерах. Зоны окисления сульфидов (главным образом широко развитых пирита и марказита), образующих жилы и гнезда в слаборастворимых алюмосиликатных породах, выступают в качестве источника кислых сульфатных растворов с широким спектром подвижных продуктов окисления. Частичная нейтрализация растворов кальцийсодержащими гипергенными водами проявляется в развитии гипса и водных сульфатов двухвалентного железа (мелантерита и пр.); вокруг зерен галенита формируются оторочки англезита. На поверхности окисляющегося пирита отмечаются микрофазы сернистого серебра (по составу близкого к акантиту) и, среди мелантерита, редкие микрофазы самородного серебра (рисунок 1-А). Выходы кислых вод (с рН ~2), фильтрующихся по зонам трещиноватости в силикатных породах, приводят к выделению гелей на сводах и стенках горных выработок, за счет которых образуются оксигидраты железа, с которыми ассоциируют частички сернистого серебра микронной размерности. Энергетические рентгенофлуоресцентные спектры оксигидратов указывают на присутствие меди, цинка, марганца, свинца, не образующих самостоятельных фаз. Неустойчивость оксигидратовой ассоциации в условиях кислой среды (с рН <3) позволяет рассматривать участки как промежуточный физико-химический барьер на пути миграции тяжелых металлов. Основными естественными геохимическими барьерами выступают щелочной, приуроченный к участкам осаждения из гипергенных водных растворов карбонатов (обладающих эффективным рН-буферизирующим потенциалом по отношению к продуктам разложения сульфидов), и сульфатный, приуроченный к зонам окисления баритовых жил. Каждый из этих барьеров характеризуется специфичными микроминеральными ассоциациями.

Карбонаты формируют натечные агрегаты в горных выработках и участки карбонатной цементации в отвалах. Натечные образования на сводах и стенах горных выработок характеризуются микрокристаллической структурой, в основной массе выделяются капилляры, выполненные ещё более тонким, вплоть до амфорного, карбонатом. Агрегаты зональные: на поверхности представленные щетками микрокристаллов, во внутренних зонах – массивные (рисунок 1-Б). По результатам рентгенофазового анализа карбонат является кальцитом (при отсутствии арагонита). Химический состав зон существенно не меняется; типичными изоморфными 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 50 мкм. На

поверхности натечных образований отмечаются оксигидраты железа, кальцийсодержащий барит, англезит, смитсонит, а также недиагностируемые уверенно по результатам микроанализа водные сульфаты и карбонаты цинка и свинца (рисунок 1-В). Локализация на поверхности карбонатных агрегатов позволяет предполагать активную роль сорбционных процессов. Неустойчивость сорбированных соединений приводит к подвижности катионов металлов (частично в ходе обменных реакций образующих карбонаты), способных, согласно результатам EXAFS-спектроскопии, «встраиваться» в кальцит, замещая кальций с образованием на поверхности комплексов разной конфигурации [5]. Можно предположить, что последующее перераспределение катионов определяется кристаллохимическими особенностями: ограниченная смесимость возможна между тригональными $ZnCO_3$ и $CaCO_3$, но кальцитовый состав ограничивает вхождение ромбического $PbCO_3$ («удобного» для структуры арагонита). Данное предположение может служить объяснением постоянного присутствия в гипергенном кальците изоморфной примеси цинка и отсутствия примеси свинца, фиксируемого в виде микрофаз церуссита на поверхности кальцитовых агрегатов. Часть осажденных на поверхности карбонатов соединений разлагается, определяя, в частности, дальнейшую миграцию железа, меди и свинца.

Ещё один эффективный геохимический барьер связан с участками микротрещиноватости и полостями баритовых жил, где формируются сульфатные ассоциации. Среди сульфатов наиболее распространен гипс, образующий корочки, присыпки и микрокристаллы в тонких трещинах и полостях, где обычно ассоциирует с сульфатами меди – брошантитом, серпьеритом и девиллином (рисунок 1-Г), а также часто с ярозитом-плюмбоярозитом, гемиморфитом, брошантитом, мелантеритом. Парагенезис указывает на участие в формировании гидрокарбонатов щелочных металлов. За счет присутствующего в баритовых жилах галенита образуется англезит, развивающийся на поверхности последнего, либо выполняющий пустоты (ассоциируя в этом случае с плюмбоярозитом и гемиморфитом). В ассоциации с сульфатами отмечаются гемиморфит, минералы глин и гидрогетит. Примечателен состав девиллина: минерал характеризуется переменным содержанием цинка и присутствием никеля в количестве до 0,4-1,4% вес., источником которого, вероятнее всего, являются никелевые руды Даховского месторождения.

Выводы. Неэксплуатируемое с начала 1990-х годов Белореченское месторождение является открытой природно-техногенной системой с активной миграцией широко спектра элементов, геохимически связанной, с одной стороны, с геологическими объектами нижележащего Даховского месторождения, с другой – с поверхностными ландшафтами.

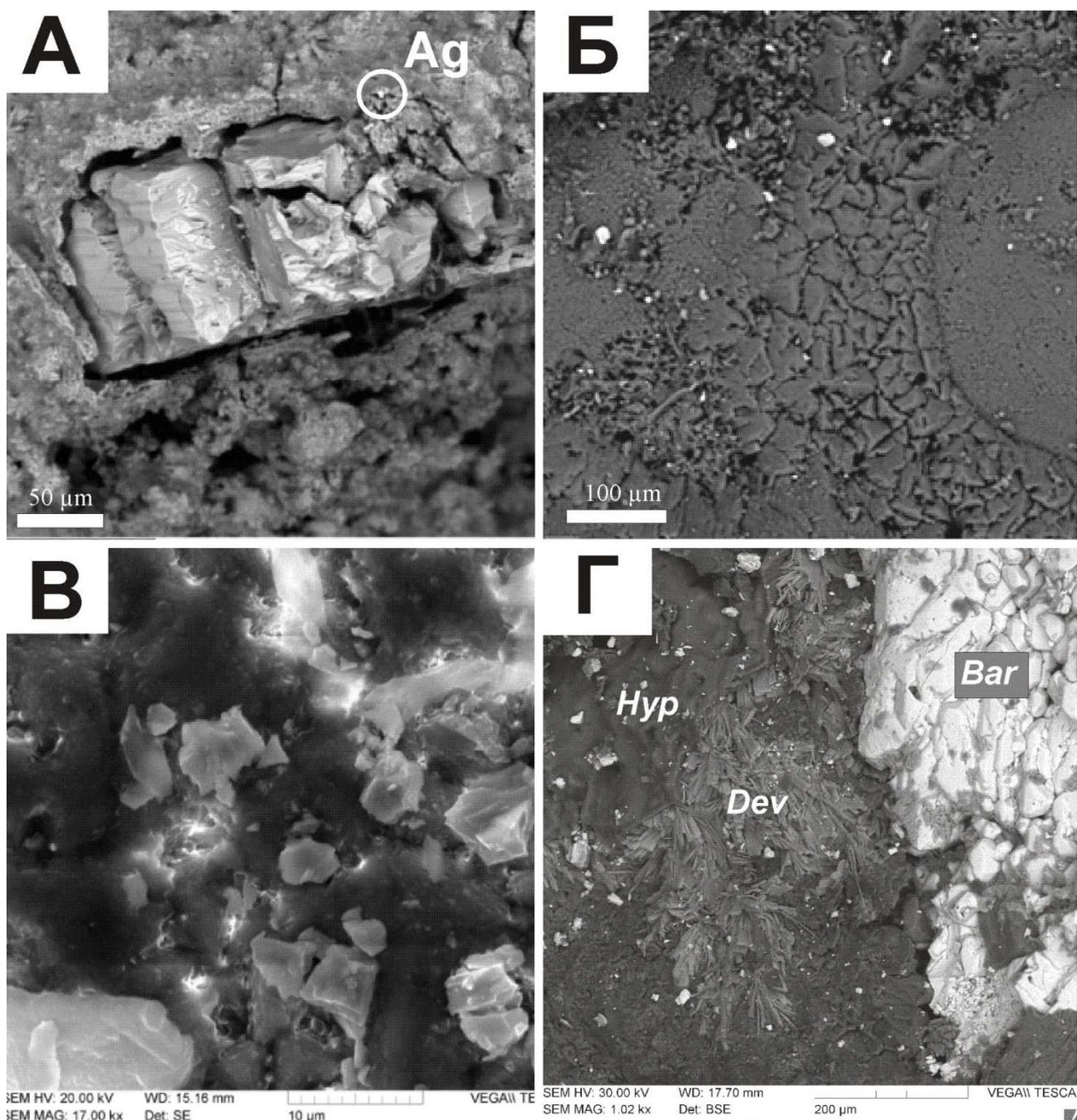


Рисунок 1. Микроминеральные ассоциации зон современного минералообразования: А - продукты окисления сульфидов с микрофазами серебра, Б – микростроение кальцитовых агрегатов (белое – микроминералы тяжелых металлов); В – сульфаты цинка на поверхности кальцита; Г – гипс (*Hyp*) и девиллин (*Dev*) на барите (*Bar*).

Признаков концентрирования ЕРН как в виде самостоятельных минеральных фаз и изоморфных примесей в минералах ассоциаций, приуроченных к геохимическим барьерам, так и в почвах природных ландшафтов, прилегающих к месторождению, не установлено. Значения и вариации удельной активности ЕРН в почвах района исследования обусловлены особенностями почвообразования, климатическими условиями и свойствами самой почвы.

Выделяющиеся в процессе взаимодействия сульфидных руд с инфильтрационными водами подвижные соединения тяжелых металлов дифференцированно осаждаются на естественных физико-химических барьерах, часть которых выступает в роли промежуточных концентраторов металлов в микроминеральных формах. При окислении сульфидных руд (изучены главным образом участки окисления пиритовых жил) отмечается концентрирование в виде фаз микронной размерности сернистого серебра (акантита) на поверхности разлагающихся минералов. Вынос продуктов окисления кислыми сульфатными водами и их последующее отложение на окислительном кислородном барьере определяет формирование неустойчивых оксигидратов железа. Устойчивые минералы-концентраты образуются на щелочном карбонатном барьере (где в минеральные фазы связываются барий, цинк, стронций) и сульфатном барьере в зонах разложения баритов (где связываются свинец, медь, частично железо). При этом выявляются несколько механизмов связывания металлов в устойчивые минеральные фазы: изоморфное вхождение в ходе кристаллизации, соосаждение в разных минеральных фазах, сорбирование с последующим разрушением комплексов сорбата и перераспределением металлов.

Не оценивая в рамках данной работы количественные значения выноса элементов в природные ландшафты, лишь отметим, что качественных признаков, указывающих на их патогенное воздействие, не отмечается. Причинами тому служат как высокий нейтрализующий потенциал природной среды, определяемый сочетанием разных групп горных пород в условиях активного водообмена по зонам тектонической трещиноватости, так и динамичность горных ландшафтов.

Список литературы

1. Пеков И.В., Левицкий В.В., Кривовичев В.Г. Минералогия Белореченского месторождения (Северный Кавказ, Россия) // Минералогический альманах. – 2010. – Т. 15. – Вып. 2. – С. 96.
2. Попов Ю.В. Роль ультрабазитов Даховского горста Северо-Кавказского краевого массива как рудолаколизующего и рудогенерирующего фактора / ред. Чайковский И.И. // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского : сб. науч. ст. – 2012. – Вып. 15. – С. 282-285.
3. Попов Ю.В., Бураева Е.А., Попова Н.М., Дергачева Е.В. Оценка радиоактивности горных пород некоторых месторождений и рудопроявлений горной части Адыгеи // Современные проблемы геологии, географии и геоэкологии : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения В.И. Вернадского. – Махачкала : АЛЕФ, 2013. – С. 79-90.

4. Труфанов В.Н., Попов Ю.В., Цицуашвили Р.А., Труфанов А.В., Гончаров А.Б. Родингиты Даховского кристаллического массива (Северо-западный Кавказ) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 5. – С. 73-77.

5. Elzinga E.J., Rouff A.A., Reeder R.J. The long-term fate of Cu^{2+} , Zn^{2+} , and Pb^{2+} adsorption complex at the calcite surface: an X-ray absorption spectroscopy study // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2006. – V. 70. – P. 2715-2725.

Рецензенты:

Вардуни Т.В., д.п.н., к.б.н., профессор, заведующая отделом экологических инноваций Научно-исследовательского института биологии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону.

Закруткин В.Е., д.г.-м.н., профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии геолого-географического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону.