Оценка динамики взаимодействия вода:порода по подповерхностным (методом электротомографии) и поверхностным (по газовым эманациям) проявлениям на примере сульфидсодержащих отходов Салаирского ГОК

Еделев А. В., Юркевич Н. В., Бортникова С. Б., Федорова Т. А., Карин Ю. Г., Оленченко В. В., Осипова П. С.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия,
e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru*

АННОТАЦИЯ: В работе были определены изменения в геоэлектрическом строении сульфидсодержащих хвостохранилищ и в концентрациях газов (SO_2 , CS_2 , CH_4S , $\text{C}_2\text{H}_6\text{SO}$) в зависимости от колебаний условий окружающей среды: температуры и влажности грунта и воздуха. Регулярные (каждый час) наблюдения показали, что конфигурация геоэлектрического профиля меняется в течение дня. Концентрация газов в приземном слое воздуха варьировалась в соответствии с температурными условиями окружающей среды. Ночью при максимальном перепаде температур (в воздухе 14,1 °C, а в грунте 20,8 °C) происходило увеличение концентрации всех измеренных газов. Локальные аномалии с наибольшим изменением электросопротивления связаны с зонами наиболее активного газовыделения.

Assessment of the dynamics of water: rock interaction by subsurface (by electrotomography) and surface (by gas emanations) manifestations as an example of sulfide-containing wastes from the Salair GOK

Edelev A. V., Yurkevich N. V., Bortnikova S. B., Fedorova T. A., Karin Yu. G., Olenchenko V. V., Osipova P. S.

*Institute of Petroleum Geology and Geophysics A.A. Trofimuka SB RAS, Novosibirsk, Russia,
e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru*

ABSTRACT: In the work, changes in the geoelectric structure of sulfide-containing tailings and in gas concentrations (SO_2 , CS_2 , CH_4S , $\text{C}_2\text{H}_6\text{SO}$) were determined depending on fluctuations in environmental conditions: temperature and humidity of the soil and air. Regular (every hour) observations showed that the configuration of the geoelectric profile changes throughout the day. The concentration of gases in the surface air layer varied in accordance with the ambient temperature conditions. At night, at the maximum temperature difference (in the air 14,1 °C, and in the soil 20,8 °C), an increase in the concentration of all measured gases occurred. Local anomalies with the greatest change in electrical resistance are associated with zones of the most active gas evolution.

ВВЕДЕНИЕ

Сульфидсодержащие отходы горно-добывающей промышленности являются источником кислых дренажных потоков [8, 11], загрязнения почв [7], а также источником выделений в атмосферу различных соединений [5, 12, 14]. Процессы окисления вещества хвостохранилищ, а также образование и миграцию поровых растворов можно изучать с помощью электротомографии с методом сопротивлений (ЭМС) [13], в том числе с микромасштабным применением ЭМС [14]. Использование микроэлектротомографии позволяет детально рассмотреть структуру подповерхностного пространства, объединить полученную информацию об удельном электрическом сопротивлении (УЭС) вещества с данными геохимических испытаний и построить корреляционные зависимости между электрофизическими параметрами, факторами окружающей среды (температура, давление и влажность) и химическим составом вещества. Геофизические наблюдения позволяют нам очертить зоны с наибольшими коле-

баниями влажности и, как следствие, газовыми выбросами. Изменения концентрации газа связаны с изменениями атмосферного давления, количества осадков, насыщением вадозной зоны [10], и изменениями физических и геохимических параметров (проницаемость, капиллярный эффект, растворимость и диффузия газов) водоносного горизонта [6]. УЭС почвы тесно связан с температурой воздуха, которая впоследствии влияет на выделение газов. Промежуточные наблюдения за хвостохранилищами с помощью ЭМС позволили определить зоны активного окисления, в том числе с выбросами газов [14].

Однако связь УЭС с вышеупомянутыми факторами (внешними, внутренними и биогенными) остается недостаточно понятной. В то же время понимание этих взаимосвязей облегчает интерпретацию данных ЭМС по времени и определение областей с максимальным производством опасных газов. Эта информация важна при разработке программ оценки экологических рисков.

Цель этой работы состояла в том, чтобы показать, как совместное применение геофизических методов с газовыми исследованиями может использоваться для обнаружения зон дегазации на участках с заброшенными хвостохранилищами.

ОБЪЕКТЫ

Предметом исследования являются складированные отходы обогащения руд Салаирских барит-полиметаллических месторождений [1]. Салаирский горно-обогатительный комбинат (СГОК) стабильно функционировал с начала 30-х годов XX-го до начала XXI-го века и являлся крупным производителем баритового, свинцового и цинкового концентратов с попутным извлечением золота и серебра. С 1970-х годов отходы СГОК складировались в хвостохранилище Салагаевский лог. Общий объем накопленных отходов ~ 35 млн.т. Хвостохранилище расположено южнее Салаирского рудного поля и г. Салаир на склоне горы, сложенной докембрийскими известняками. Морфологически оно представляет собой два естественных лога, заполненных при помощи системы гидротранспорта отвальными хвостами обогатительных фабрик. Вдоль северного основания склона по долине проходит русло реки Малая Талмовая, впадающей в речную систему: р. Талмовая => р. М. Бачат => р. Бачат => р. Иня => р. Обь. В составе поступающего твердого материала основную долю составляли остатки вмещающих пород (кварцевые порфиры, серицитовые сланцы, мелкозернистые известняки) и жильные минералы (кварц (67%), барит (10%), кальцит (7%), мусковит (4%), каолинит (3%), полевой шпат (2%)). Сульфиды (2–4 %) были представлены пиритом (3%), сфалеритом (0,6%), галенитом (0,2%) [1]. В настоящее время комбинат переживает сложные времена. На рубеже 20-го и 21-го веков СГОК пережил банкротство, введение внешнего управления, отказ от добычи свинцово-цинковых руд как от нерентабельной деятельности и перенос основного внимания на извлечение серебра и золота и производство барита, востребованного при нефтедобыче [2]. Затем в 2013 году владельцами СГОК было принято решение остановить горные работы на карьерах, обогатительную фабрику, затем карьеры законсервировать, а фабрики и другие опасные объекты (за исключением хвостового хозяйства, шахтного подъема и водоотлива) ликвидировать [3]. Но уже в 2015 году администрация Кемеровской области строит планы по восстановлению производства на СГОК для решения социально-экономических проблем региона [4].

Осушенная поверхность хвостохранилища состоит из мелкозернистых песков светло-серого или желтоватого цвета. В последние несколько лет объем материала в зоне аэрации увеличивается. Постепенный естественный дренаж хвостов (из-за прекращения поступления свежей пульпы) способствует доступности вещества в аэробной зоне для окислительного воздействия кислорода.

МЕТОДЫ

Микроэлектротомографию проводили в восточной части хвостохранилища. «Микро» представляет собой небольшой шаг между электродами по сравнению с обычными измерениями [13]. Измерения проводились на многоэлектродном аппарате СКАЛА-48 (разработан в ИНГГ СО РАН, Новосибирск). Последовательность подключения электродов соответствовала дипольно-осевой установке. Количество электродов составляло 48, межэлектродное расстояние - 0,2 м, длина профиля - 9,1 м, а глубина исследования - до 1,5 м. Значения удельного сопротивления измеряли каждый час в течение суток. Обработка данных проводилась с использованием программы двумерной инверсии Res2Dinv [9]. Температура хвостов была определена на глубине 0,1 м в середине профиля лабораторным электронным термометром ЛТ-300 с датчиком из нержавеющей стали (ООО «Термекс», Томск).

Газовые исследования на хвостохранилище проводились в трех точках по профилю ЭМС с использованием переносного газоанализатора ГАНК-4 (ООО «НПО ПРИБОР ГАНК», Москва). Были измерены концентрации ДМС (диметилсульфид C_2H_6S), ДМСО (диметилсульфоксид C_2H_6SO), сероуглерода (CS_2) и диоксида серы (SO_2) и температура атмосферного воздуха над поверхностью земли. Трубка газоанализатора находилась на расстоянии 10 см от поверхности почвы, и три параллельных показания концентрации газа были записаны с последующим усреднением измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемый профиль состоит из вещества с относительно высокой электропроводностью, а геоэлектрическое зонирование поверхностной части обусловлено различной водонасыщенностью вещества. Начало профиля было представлено влажным мелкозернистым веществом (влажность 35%), которое затем было заменено мелкозернистым песком с более низкой влажностью (влажность 20%); в конце профиля были крупнозернистые почти сухие пески (влажность 10%). Соответственно, на первых 5 метрах профиля была определена самая низкая зо-

на сопротивления (0-15 Ом·м), простирающаяся на глубину 0,5 м (рис. 1). Затем она заменяется зоной с более высоким удельным сопротивлением (20 - 65 Ом·м); к концу профиля область состоит из почти сухого вещества, а значения удельного сопротивления составляют 100 - 190 Ом·м. В середине профиля четко показана зона с низкими значениями удельного сопротивления, простирающаяся ниже глубины зондирования (2,5 м), и эту конфигурацию можно интерпретировать как проницаемый канал, через который поверхностные воды протекают в более глубокие участки секции профиля. и, наоборот, в сухую погоду может происходить инфильтрация поровой воды на поверхность.

Рис. 1. Геоэлектрические разрезы в разное время суточных наблюдений (с 13.00 первого дня до 13.00 следующего дня)

Концентрации всех измеренных газов (CO , SO_2 , ДМС, ДМСО и H_2S) увеличились с 13:00 до 15:00 в первый день, когда температура воздуха уменьшилась, а температура грунта выросла (рис. 2 и 3). Последующее охлаждение почвы привело к незначительному снижению концен-

трации газа, и во время атмосферных осадков было зафиксировано резкое снижение концентрации газа.

Исключением является H_2S , и его концентрация продолжала увеличиваться; мы связываем это увеличение с ускорением неорганических реакций с увеличением влажности еще теплой почвы. Получение других обсуждаемых газов больше связано с микробиологической активностью [5, 14], которая строго зависит от температурных условий. Ночью генерация газов CO , SO_2 и ДМС была минимальной, в то время как H_2S регистрировался при максимальных концентрациях. ДМСО также выделялся наиболее интенсивно в начале ночи, но затем наблюдалось резкое снижение концентрации. Мы связываем особенности распределения газа во времени со спецификой различных бактерий, функционирующих в почве [5].

Рис. 2. Концентрации газов в приземном слое атмосферного воздуха в течение суток. Величины SO_2 и CO в мг/м^3 , ДМС, ДМСО и H_2S – мкг/м^3 , по горизонтальной оси – время

Рис. 3. Динамика температуры в течение суток

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования динамики геоэлектрических параметров на Салагаевском хвостохранилище было установлено, что условия окружающей среды активно влияют на внутреннюю структуру сульфидных хвостов и приводят к изменению УЭС в поверхностных частях разреза даже в течение дня. Колебания

температуры грунта происходили в соответствии с температурой воздуха с задержкой от 2 до 3 часов для наблюдаемого периода, что влияло на УЭС среды. Еще более эффективным фактором в изменениях УЭС являются атмосферные осадки, в связи с которыми происходит увлажнение вещества, что приводит к уменьшению УЭС вещества.

Наибольший диапазон суточных колебаний УЭС среды в зависимости от температуры воздуха был обнаружен для крупнозернистого сухого вещества, в которое легко проникают поверхностные воды (осадки). В то же время в области с изначально низким сопротивлением (вещество с высокой влажностью) колебания внешних условий не вызывают существенных изменений. Зоны относительно высокого сопротивления соответствуют веществам, которые изменились из-за гиперкриогенеза: сезонное замерзание и оттаивание в сильно континентальном климате, что приводит к растрескиванию почвы, увеличению ее проницаемости и интенсивным процессам окисления.

Влияние сульфидсодержащих отходов на окружающую среду выражаются в интенсивности образования газа, которая напрямую зависит от состава и состояния вещества. Обнаружены вариации концентраций CO, SO₂, ДМС, ДМСО и H₂S в течение дня, соответствующие изменениям геоэлектрических параметров разреза. Суточные изменения удельного электрического сопротивления хвостов обратно пропорционально связаны с колебаниями температуры воздуха и почвы. Газовые выбросы напрямую зависят от температуры. Области наибольшего изменения УЭС соответствуют проводящим жидкостью каналам.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-17-00134).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортникова С. Б., Гаськова О. Л., Айриянец А. А. Техногенные озера: формирование, развитие и влияние на окружающую среду. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. – 120 с.
2. Лавренков И. Салаирскому ГОКу приказали выдать зарплату // Коммерсантъ.Сибирь. – №120. – 2003. – с. 12.
3. Лавренков И. Салаирский рудник исчерпал себя // Коммерсантъ. Сибирь. – № 63. – 2013. – с. 6.
4. Скворцова В. Первоочередные задачи поставлены // Кузбасс. – № 137 (26313). – 2015. – с. 2.
5. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A., Troshkov M., Abrosimova N., Kirillov M., Korneeva T., Kremleva, T. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste // Science of the Total Environment. – V. 647. – 2019. – p. 411-419.
6. Cahill A. G., Steelman C. M., Forde O., Kuloyo O., Ruff S. E., Mayer B., Mayer K.U., Strius M., Ryan M.C., Cherry J.A., Parker B. L. Mobility and persistence of methane in groundwater in a controlled-release field experiment // Nature Geoscience. – V. 10 (4). – 2017. – p. 289-294.
7. Choudhury B. U., Malang, A., Webster R., Mohapatra K. P., Verma B. C., Kumar M., Das A., Islam M., Hazarika S. Acid drainage from coal mining: Effect on paddy soil and productivity of rice // Science of the Total Environment. – V. 583. – 2017. – p. 344-351.
8. Dutta M., Islam N., Rabha S., Narzary B., Bordoloi M., Saikia D., Silva L.F.O., Saikia B. K. Acid mine drainage in an Indian high-sulfur coal mining area: Cytotoxicity assay and remediation study // Journal of Hazardous Materials. – V.389. – 2020. – p. 121851.
9. Loke M. H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys. – Austin: Advanced Geosciences Inc., 1999. – 61 p.
10. Terry N., Slater L., Comas X., Reeve A. S., Schäfer K. V., Yu Z. Free phase gas processes in a northern peatland inferred from autonomous field-scale resistivity imaging // Water Resources Research. – V. 52. – 2016. – p. 2996-3018.
11. Tomiyama S., Igarashi T., Tabelin C. B., Tangvirorn P., Ii H. Acid mine drainage sources and hydrogeochemistry at the Yatani mine, Yamagata, Japan: a geochemical and isotopic study // Journal of contaminant hydrology. – V. 225. – 2019. – p. 103-502.
12. Voltattorni N., Lombardi S., Beaubien S. E. Gas migration from two mine districts: the Tolfa (Lazio, Central Italy) and the Neves-Corvo (Baixo Alentejo, Portugal) case studies // Journal of geochemical exploration. – V. 152. – 2015. – p. 37-53.
13. Yurkevich N.V., Abrosimova N.A., Bortnikova S.B., Karin Y.G., Saeva O.P. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area // Toxicological & Environmental Chemistry. – V. 99 (9-10). – 2017. – p. 1328-1345.
14. Yurkevich N.V., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Yurkevich N., Edelev A., Saeva O., Shevko A. Sulfur and Nitrogen Gases in the Vapor Streams from Ore Cyanidation Wastes at a Sharply Continental Climate, Western Siberia, Russia. // Water, Air, & Soil Pollution. – V. 230 (12). – 2019. – P. 307.