



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ИЗЛИВОВ КИСЛЫХ ВОД КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА USING GEOCHEMICAL BARRIERS FOR PURIFICATION OF THE ACID WATER EFFUSIONS IN THE KIZEL COALFIELD

МАКСИМОВИЧ Н.Г.

*Зам. директора по научной работе Естественно-научного института
Пермского государственного университета (ЕНИ ПГУ),
nmax54@gmail.com*

MAXIMOVICH N.G.

*The deputy director of the Institute of Natural Sciences
of Perm State University (INS PSU),
nmax54@gmail.com*

Ключевые слова:

*геохимические барьеры; Кизеловский угольный бассейн;
кислые шахтные воды; отходы содового производства.*

Key words:

*geochemical barriers; Kizel coalfield; acid mine water; alkaline
waste products; soda production waste.*

Аннотация

В статье на примере Кизеловского угольного бассейна (Пермский край), шахты которого были ликвидированы в 1997–2002 годах, рассмотрена проблема загрязнения окружающей среды самопроизвольными излиями кислых шахтных вод. Предлагается оригинальный и экономичный способ очистки этих вод отходами содового производства. Образующийся при этом осадок можно использовать для рекультивации шахтных отвалов.

Abstract

By the example of the Kizel coalfield (Perm Kray) mines of which were liquidated in 1997–2002 the article considers the problem of environmental pollution by spontaneous effusions of acid mine water. An original and economical method of purifying the water by soda production waste is proposed. The generated sediment can be used for reclaiming the mine dumps.

Разработка угольных месторождений приводит к существенному ухудшению экологической обстановки, что во многом обусловлено литолого-геохимическими особенностями угленосных формаций. Закрытие угледобывающих предприятий в ряде случаев приводит к еще большему ухудшению состояния окружающей среды. Это связано в т.ч. с тем, что после ликвидации шахт их инфраструктура (включая отвалы, излия и др.) остается бесхозной. В случае перепрофилирования объектов угледобычи новые владельцы не в состоянии решить накопившиеся за многие годы экологические проблемы. В этой связи требуется поиск простых и малозатратных технологий улучшения экологической обстановки на таких территориях.

Угленосные формации занимают 15% общей площади континентов. Угленосные толщи имеют ритмичное строение: между угольными пластами последовательно залегают слои известняков и обломочных пород с изменением крупности частиц — аргиллиты или глины, алевролиты или супеси, песчаники или пески, а потом в обратной последовательности. При наличии соответствующих условий в известняках могут развиваться карстовые процессы. Особенностью подземной гидросферы таких территорий является высокая водообильность пород.

Угленосные толщи имеют ряд геохимических особенностей, которые могут существенно повлиять на экологическую обстановку угледобывающих районов в периоды разработки месторождений и после ее окончания. В углях обнаружено более 50 элементов, содержащихся в значительных количествах. Концентрации 12 из них выше фоновых в 10–1000 раз. Содержание серы (представленной в сульфидной, органической, сульфатной и элементарной формах) в угольном веществе месторождений территории бывшего СССР в среднем составляет 1,5% (в европейской части — 3,8%, в Сибири — 2,7%, в Казахстане — 2,0%, в Приморье — 0,4% и т.д.), что в 10 раз больше, чем в осадочных породах, и в 50 раз выше кларка этого вещества в земной коре.

Кизеловский угольный бассейн (КУБ), находящийся в Пермском крае, является классическим примером того, как после ликвидации угледобывающих предприя-

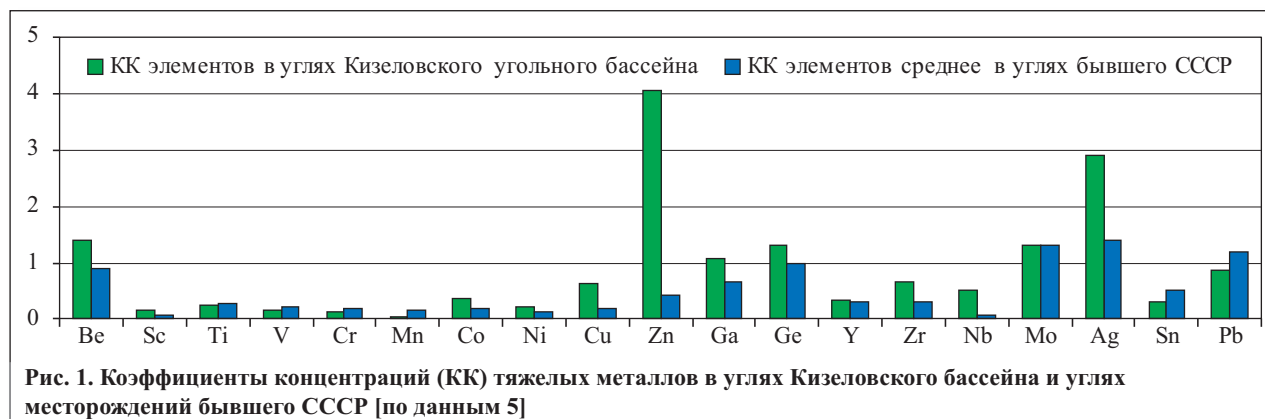


Рис. 1. Коэффициенты концентраций (КК) тяжелых металлов в углях Кизеловского бассейна и углях месторождений бывшего СССР [по данным 5]

тий, работавших с XVIII в., обостряются экологические проблемы. На территории этого бассейна происходит интенсивное загрязнение окружающей среды, что обусловлено в т.ч. особенностями угленосной толщи. Каменный уголь здесь отличается большим содержанием серы (5,8%), представленной главным образом в виде пирита, и высокой зольностью (21,5%) [5]. Среднее содержание многих тяжелых металлов превышает среднюю концентрацию по угольным месторождениям бывшего СССР (рис. 1).

Другой особенностью КУБ является интенсивная карстованность его территории. Карст здесь относится к голому и покрытому типам, что является одним из факторов зависимости режима карстовых вод в зоне их активной циркуляции от режима атмосферной циркуляции осадков [6, 10]. Вследствие дислоцированности угленосной толщи, больших глубин ее разработки (до 1000 м) и закарстованности вышележащих известняков условия добычи угля в КУБ характеризуются как сложные. В зонах развития карста водопритоки в шахты в свое время достигали 2500 м³/ч. Таким образом, в пределах Кизеловского угольного бассейна имелись условия для интенсивного загрязнения окружающей среды при разработке угольных пластов.

При содержании пирита более 4% шахтные воды вследствие его окисления приобретают кислую реакцию (рН=2÷3) и сульфатный состав. Эти сульфатно-железисто-алюминиевые и натриево-кальциевые воды имеют минерализацию 2,5–19,0 г/л. В ходе эксплуатации месторождения в связи с увеличением водопритоков, воздухообмена и объема пород, вовлеченных в геохимические процессы, минерализация шахтных вод может возрастать (табл. 1). В кислой шахтной воде по

сравнению с природной на несколько порядков выше содержание свинца, меди, цинка, серебра, никеля, кобальта и др. (табл. 2).

При работе угледобывающих предприятий КУБ шахтные воды сбрасывались в местную гидросеть без очистки (объемом до 100 млн м³ в год). Выше мест сброса вода в реках была гидрокарбонатно-кальциево-натриевой, имела минерализацию 90–150 мг/л и реакцию среды, близкую к нейтральной. Ниже по течению от мест сброса она становилась сульфатно-железисто-алюминиевой с минерализацией 640–6000 мг/л (при содержании сульфатов до 3700 мг/л, железа — до 900 мг/л, алюминия — до 160 мг/л, при высоком содержании тяжелых металлов и рН = 2,5÷2,9).

Ликвидация шахт Кизеловского угольного бассейна в 1997–2002 гг. не решила экологических проблем. Откачка кислых шахтных вод (КШВ) на поверхность была прекращена. В результате КШВ затопленных горных выработок начали смешиваться с подземными водами (ПВ) и формировать техногенные водоносные горизонты мощностью 25–30 м [4]. После восстановления уровня ПВ начались самопроизвольные изливы шахтных вод на поверхность. В настоящее время существует более 14 таких участков (рис. 2). Общий объем изливов за 2009 г. составил 16,3 млн м³. Это почти в 7 раз меньше, чем было во время работы всех шахт КУБ. Однако указанные изливы остались мощным источником загрязнения поверхностных вод (рис. 3). В этих водах сохраняются высокие концентрации двухвалентного железа (3,6 г/л), алюминия (157 мг/л) и марганца (35 мг/л). Их рН изменяется от 2,4 до 3,9.

Отметим, что аналогичные проблемы возникают и при закрытии шахт других угольных бассейнов.

Таблица 1

Воды	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Fe _{общ.}	Al ³⁺	Mg ²⁺	рН	Минерализация
Подземные	12–280	2–99	2–44	0,5–10	4–148	нет	нет	0,5–24	7,3–7,5	60–1500
Шахтные	–	644–6177	7–74	115–629	40–243	131–3727	29–494	17–115	2,2–3,1	2500–19000

Таблица 2

Воды	Pb	Cu	Zn	Ag	Ni	Co
Подземные	0,0017	0,003	0,0079	0,00052	0,0071	0,00064
Шахтные	0,003–0,022	0,043–0,560	0,64–1,10	0,010–0,027	0,036–3,890	0,067–2,880



Рис. 2. Результат самоизлива заброшенной шахты им. 1 Мая

Например, на Йоркширском месторождении угля в Великобритании [13] изливающиеся на поверхность воды содержат до 100 мг/л общего железа. В Японии после закрытия 60 лет назад угольного бассейна на о. Кюсю самоизливы шахтных вод существенно ухудшают качество поверхностных водотоков. Общее содержание железа в них достигает 119 мг/л, а сульфат-анионов — 1430 мг/л [15].

Воздействие самоизливов на поверхностные воды на территории Кизеловского угольного бассейна уже приобрело региональный масштаб. При смешивании КШВ с речными водами и увеличении pH ион Fe^{2+} больше, чем Fe^{3+} , преобразуется в осадок. Это привело к загрязнению рек на протяжении десятков километров (рис. 4), чего не наблюдалось при работе шахт.

Воды самоизливов поступают в 19 рек. В реке Кизел (притоке реки Вильва), испытывающей наибольшее загрязняющее влияние шахтных вод, среднегодовое содержание железа составляет 2160 ПДК (в зимнюю ме-

жень — до 4690 ПДК), марганца — 516 ПДК. Концентрации никеля, меди и цинка также превышают предельно допустимые [11]. Даже для крупных рек, таких как Косьва и Вильва, постоянно наблюдаются высокие и экстремально высокие уровни загрязнения воды по общему содержанию железа. В 2010 г. среднегодовые концентрации $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в реке Вильва составили 197 ПДК (зимой — до 468 ПДК), марганца — 37 ПДК, никеля и меди — 2 ПДК. В реке Косьва среднегодовая концентрация общего железа составила 43 ПДК, марганца — 18 ПДК, а индекс загрязненности воды достиг 7 (что соответствует классу качества «вода чрезвычайно грязная») [11].

На загрязняемых участках рек ежесуточно формируются десятки тонн техногенных донных осадков, представленных в основном аморфными гидроксидами железа и алюминия и имеющих высокое содержание Mn, Cu, Ni, Zn, Pb и др. (рис. 5). При смыве в Камское водохранилище и р. Чусовую они являются вторичными ис-

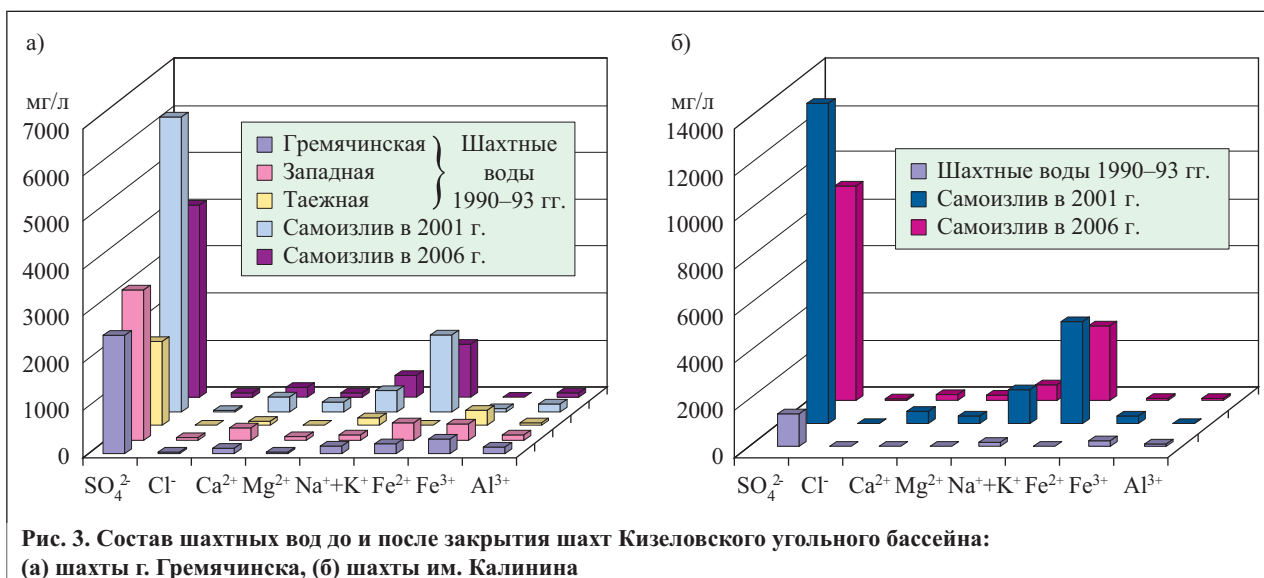


Рис. 3. Состав шахтных вод до и после закрытия шахт Кизеловского угольного бассейна: (а) шахты г. Гремячинска, (б) шахты им. Калинина

точниками загрязнения этих водоемов, что представляет угрозу для питьевого водоснабжения. В настоящее время на водозаборах, расположенных на значительных расстояниях от мест поступления шахтной воды ниже по течению, фиксируются превышения ПДК для железа.

К сожалению, поступление загрязнителей в реки региона за счет самоизливов шахтных вод имеет тенденцию к увеличению.

Как было показано ранее [8], улучшение состояния окружающей среды возможно путем использования геохимических барьеров. Теоретические основы таких методов были разработаны А.И. Перельманом [12] и его последователями [1–3, 14, 16].

В конце 1980-х гг. автором настоящей статьи было предложено использовать для очистки кислых шахтных вод щелочные отходы содового производства, миллионы тонн которых накопились и продолжают поступать в расположенный в относительной близости от ликвидированных шахт Кизеловского угольного бассейна шламонакопитель ОАО «Березниковский содовый завод» (БСЗ) (рис. 6). Утилизация этих отходов (так называемых «белых морей») уже в то время представляла серьезную проблему. Проведенные в те годы лабораторные эксперименты показали высокую эффективность этих отходов в качестве реагентов для очистки КШВ. Следует отметить, что их можно было использовать без специфической подготовки.

Позднее для очистки КШВ была применена простая технологическая схема. Реагент добавлялся в поток излившейся шахтной воды, а образующиеся нерастворимые вещества оседали в каскаде отстойников. Совместно с А.Б. Холостовым и В.Н. Басовым автором была разработана специальная установка, позволявшая готовить пульпу определенной концентрации из отходов БСЗ и шахтной воды и выливать ее непосредственно в канал стока самоизлива в количествах, рассчитанных в зависимости от расхода и состава воды (рис. 7) [9].

Отходы Березниковского содового завода относятся к 5-му классу опасности. Оптимальными для нейтрализации КШВ свойствами и составом обладает шлам верхнего полуметрового слоя старой карты шламонакопителя БСЗ (рис. 8). Он более чем на 90% состоит из тонкодисперсного карбоната кальция. Водородный показатель его вытяжки составляет 9–12. Вследствие промывания данного шлама атмосферными осадками содержание водорастворимых хлоридов, сульфатов и натрия в указанном слое в 37–54 раза ниже, чем в действующей карте. Содержание в нем 38 микроэлементов (определенное с помощью спектрального анализа) не превышает их валового содержания в почвах. Вредных органических примесей не обнаружено. Объем шлама, готового к использованию в качестве реагента для очистки шахтных вод без какой-либо подготовки, превышает 1 млн м³.

При смешивании кислой шахтной воды со шламом происходит повышение pH за счет взаимодействия с карбонатом и гидроксидом кальция, которые являются основными компонентами отходов БСЗ. При этом происходит очистка воды от ряда загрязнителей (соединений Fe, Al, Mn, Co, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, Ti и др.), которые при повышении pH раствора выпадают в осадок.

Испытания для валидации предложенного метода проводились на водах, самопроизвольно излившихся



Рис. 4. Результат самоизлива шахты Таежная в р. Большая Гремяча

из штольни шахты имени 40-летия Октября. В период летней межени расход самоизлива там составляет 180–220 м³/ч, а во время паводков – 300–400 м³/ч. Водородный показатель КШВ равен 2,6–2,9. Минерализация этих вод изменяется от 400–600 мг/л в периоды павод-



Рис. 5. Техногенные отложения на берегах р. Сухой Кизел



Рис. 6. Шламонакопитель ОАО «Березниковский содовый завод»

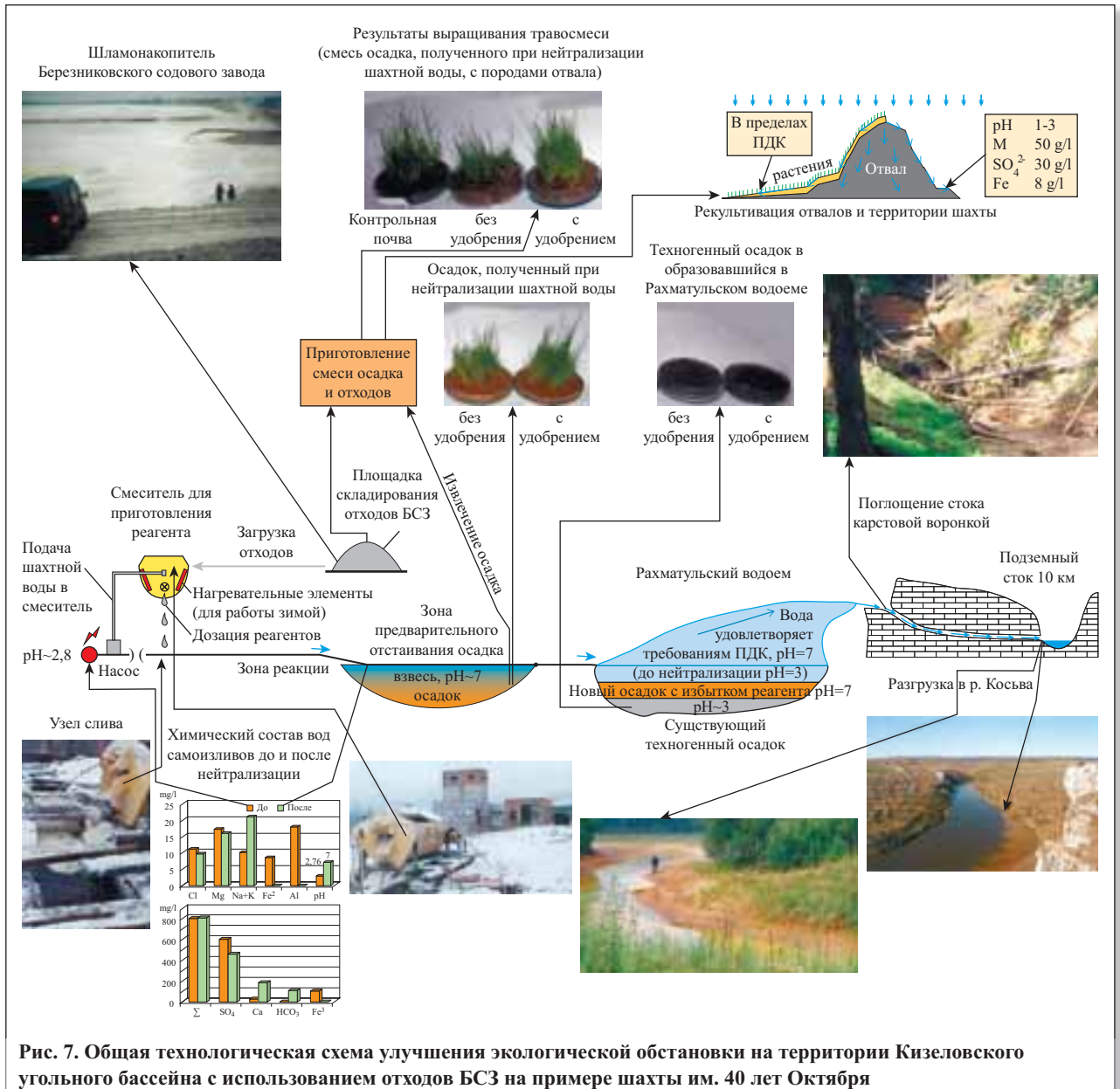
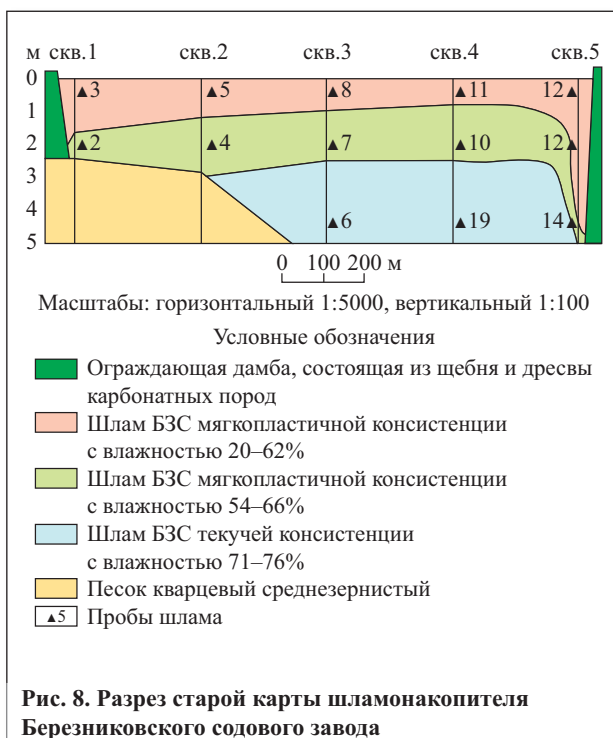


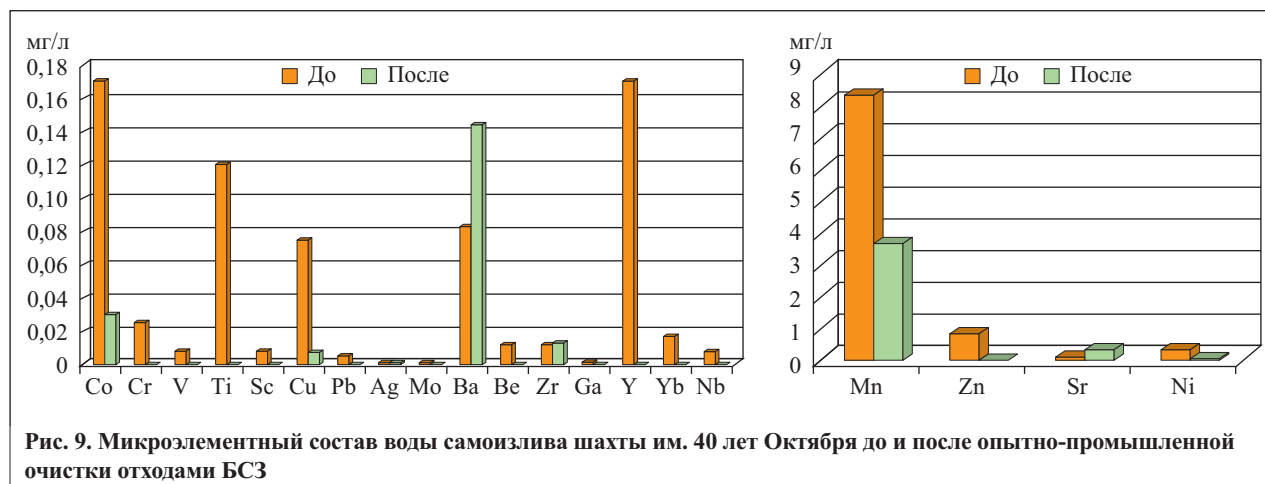
Рис. 7. Общая технологическая схема улучшения экологической обстановки на территории Кизеловского угольного бассейна с использованием отходов БСЗ на примере шахты им. 40 лет Октября



ков до 800–900 мг/л во время летней межени. Максимальное превышение ПДК_в для железа составляет 400 раз, для алюминия — 46, для сульфатов — 1,3, для бериллия — 52,8, для марганца — 36,9, для лития — 3,5, для никеля — 2,5, для кадмия — 1,9, для кобальта — 1,6, для бария — 1,5, для титана — 1,2.

В результате применения предложенного метода водородный показатель шахтной воды повысился с 2,6–2,9 до нейтральных значений, суммарное содержание железа снизилось с 30–40 до 0,2–0,3 мг/л (что не превышало ПДК). После нейтрализации в шахтной воде не было обнаружено алюминия, тогда как до нее его концентрация составляла 10–14 мг/л. Содержание бериллия, лития, никеля, кадмия, кобальта и титана также снизилось до значений, не превышавших ПДК.

Как уже отмечалось, очистка воды от образовавшихся после нейтрализации взвешенных частиц производилась в каскаде отстойников. Образовавшийся осадок имел нейтральную реакцию среды и представлял собой смесь тонкодисперсных частиц гидроксидов железа и алюминия, гипса и не прореагировавшего карбоната кальция. Подвижных форм железа, алюминия, марганца, свинца и др. практически не было обнару-



жено. После удаления осадка очищенная вода удовлетворяла требованиям ПДК (рис. 9).

Эксперименты с осадком, образовывавшимся в результате нейтрализации КШВ, проведенные В.И. Каменниковой и др., показали, что он зарастает многолетними травами (тимофеевкой, овсяницей, пыреем, люцерной) практически так же, как и контрольные образцы местной почвы. Поэтому его предлагается использовать для рекультивации шахтных отвалов (рис. 7), являющихся мощным источником загрязнения окружающей среды [7, 8].

Подчеркнем, что дополнительным плюсом предложенного метода является то, что в качестве реагентов для очистки шахтных вод используются отходы содового производства, что может решить серьезную проблему их утилизации.

Таким образом, проведенные опытно-промышленные испытания показали простоту и высокую эффективность метода использования геохимического барьера для комплексного решения сразу нескольких экологических проблем на территориях ликвидированных угледобывающих предприятий путем очистки самопроизвольно изливающихся кислых шахтных вод, утилизации щелочных отходов содового производства и рекультивации шахтных отвалов. ♣

Настоящая работа была подготовлена при поддержке гранта РФФИ 10-05-96017 р_урал_а «Теоретические основы создания искусственных геохимических барьеров для защиты окружающей среды при освоении природных ресурсов Западного Урала».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А., Алексеев Л.П. Геохимические барьеры: учеб. пособие. М.: Логос, 2003. 144 с.
2. Геохимические барьеры в зоне гипергенеза / под ред. Н.С. Касимова и А.Е. Воробьева. М.: Изд-во МГУ, 2002. 395 с.
3. Емельянов Е.М. Барьерные зоны в океане. Калининград, 1998. 416 с.
4. Имайкин К.К., Баньковская В.М., Бурковская А.В. Изменение гидрогеологической обстановки при ликвидации шахт Кизеловского угольного бассейна // Гидрогеология и карстоведение. Вып. 14. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2002. С. 145–150.
5. Клер В.Р., Неханова В.Ф., Сапрыкин Ф.Я. и др. Металлогения и геохимия угленосных и сланцевосодержащих толщ СССР. Закономерности концентрации элементов и методы их изучения. М.: Наука, 1988. 256 с.
6. Максимович Н.Г. Геохимия угольных месторождений и окружающая среда // Вестник Пермского университета. 1997. Вып. 4. Геология. С. 171–185. URL: http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0179.html.
7. Максимович Н.Г. Создание геохимических барьеров для очистки стоков породных отвалов // Уголь. 2006. № 9. С. 64. URL: <http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2006/0305.html>.
8. Максимович Н.Г. Теоретические и прикладные аспекты использования геохимических барьеров для охраны окружающей среды // Инженерная геология. 2010. № 3. С. 20–28. URL: <http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2010/0367.pdf>.
9. Максимович Н.Г., Басов В.Н., Холостов С.Б. Способ нейтрализации кислых шахтных вод и установка для его осуществления / Патент на изобретение № 2293063 РФ. 2007. Заявитель и патентообладатель ФГНУ «Естественно-научный институт». № 2005106659. Заявл. 14.03.05. Опубл. 10.02.2007.
10. Максимович Н.Г., Горбунова К.А. Геохимические изменения геологической среды при разработке угольных месторождений // Известия вузов. Геология и разведка. 1991. № 5. С. 137–140. URL: http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0123.html.
11. Материалы сборника «Состояние и охрана окружающей среды Пермского края в 2010 году» / Ежегодный экологический доклад-2010 // Официальный сайт «Природа Пермского края». 2010. URL: <http://www.permecology.ru/reports2010.php>.
12. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 288 с.
13. Burrell R., Whitworth K. The influence of minewater recovery on surface gas and water discharges in the Yorkshire Coalfield // Mine water and the Environment: Proceedings of the 7th International Mine Water Association Congress. Katowice — Ustron, Poland, 11–15 September 2000. P. 81–90.
14. Langer M. The role of geological barrier in waste disposal projects // Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens, Greece, 23–27 June 1997. Rotterdam: A.A. Balkema, 2001. V. 4. P. 3617–3635.
15. Okamoto M., Kobayashi T., Sakamoto M. Physical properties of sediments deposited in the minewater from a closed coal mine // Engineering geology for tomorrow's cities: Proceedings of the 10th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, 6–10 September 2006, Nottingham, UK. CD-ROM.
16. Sergeev V.I., Shimko T.G., Kuleshova M.L., Maximovich N.G. Groundwater protection against pollution by heavy metals at waste disposal sites // Water Science and Technology. 1996. V. 34. № 7–8. P. 383–387.