

Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А.

(Естественнонаучный институт Пермского государственного национального
исследовательского университета, г. Пермь, Россия)

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ И РАЦИОНАЛЬНОЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Аннотация

Для снижения негативного воздействия горнодобывающего производства на окружающую среду предложен способ создания искусственных геохимических барьеров, отличающийся от традиционных методов высокой эффективностью и экономичностью. 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 и предлагается эффективный способ очистки этих вод отходами содового производства. Образующийся при этом осадок можно использовать для рекультивации шахтных отвалов.

Ключевые слова: геохимические барьеры, угольное месторождение, кислые шахтные воды, отходы содового производства

Түйінді сөздер: геохимиялық кедергілер, көмір кенорны, қышқыл шахта сулары, сода өндірісінің қалдықтары.

Keywords: geochemical barriers, coal basin, acid mine discharges, soda production waste

Важнейшей задачей рационального недропользования является обеспечение экологической безопасности горнодобывающего производства. Формирующиеся при разработке горнорудных месторождений твердые, жидкие и газообразные отходы приводят к образованию техногенных геохимических аномалий, характеризующихся повышенными концентрациями загрязняющих веществ в атмосфере, почвах и горных породах, подземных и поверхностных водах, живых организмах. Концентрации отдельных химических элементов в пределах техногенных ореолов и потоков рассеяния часто превышают значения, безопасные для жизни и здоровья людей, производства сельскохозяйственной продукции и нормального развития биотических компонентов.

В последние десятилетия для защиты окружающей среды от загрязнения наметилась тенденция использования геохимических барьеров, применение которых в ряде случаев позволяет отказаться от строительства сложных очистных сооружений и проведения других дорогостоящих природоохранных мероприятий. Термином «геохимические барьеры» А.И. Перельман в 1961 г. (Perel'man, 1986) предложил называть такие участки зоны гипергенеза, в которых на коротком расстоянии происходит резкая смена условий миграции, что приводит к концентрации химических элементов.

Отличительной особенностью техногенных барьеров является возможность аккумуляции техногенных веществ, не встречающихся в природных условиях, таких как нефтепродукты, полиароматические углеводороды, пестициды и др. Концентрации веществ, имеющих природные аналоги на техногенных барьерах в ряде случаев, значительно выше, чем на природных. Изученность техногенных геохимических барьеров значительно хуже, чем природных. В настоящее время не существует единой классификации техногенных барьеров. Техногенные барьеры все чаще используются для охраны окружающей среды (Langer, 2001, Maksimovich et al, 2000; Максимович, 2010; Maksimovich, Khayrulina, 2014; Handbook of Ground water remediation..., 2002; Palmer, Wittbroadt, 1991; Förstner, 2003). Накопленный опыт показывает, что среди всего разнообразия техногенных геохимических барьеров, применяемых для этих целей, можно выделить разновидности, в которых стихийно

или целенаправленно используются естественные барьерные свойства природной среды и искусственные, созданные по специальным технологиям.

Опыт использования искусственных геохимических барьеров приведен на примере очистки шахтных самоизливов Кизеловского угольного бассейна.

На территории Кизеловского угольного бассейна происходит интенсивное загрязнение окружающей среды, что обусловлено, в том числе особенностями угленосной толщи. Каменный уголь бассейна отличается большим содержанием серы (главным образом в форме пирита) (5,8%) и золы (21,5%) (Металлогения и геохимия, 1987). Средние содержания многих тяжелых металлов в углях превышает средние концентрации по угольным месторождениям бывшего СССР (рисунок 1).

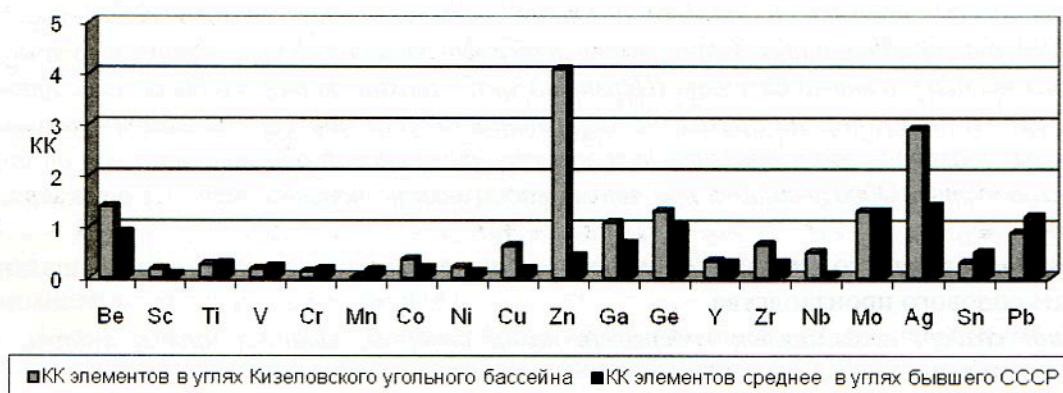


Рисунок 1 - Средние содержания тяжелых металлов в углях

Другой особенностью Кизеловского угольного бассейна является интенсивная закарстованность. Карст региона относится к голому и покрытому типам, что является одним из факторов зависимости режима карстовых вод зоны активной циркуляции от режима атмосферной циркуляции осадков (Горбунова и др., 1992; Maksimovich et al, 1995). Вследствие дислоцированности толщи, больших глубин разработки (до 1000 м) и закарстованности вышележащих известняков условия добычи угля характеризуются как сложные. Водопритоки в шахты достигали в зонах развития карста 2500 м³/час.

Эти два фактора обеспечили условия для интенсивного загрязнения окружающей среды при разработке месторождения. При содержании пирита более 4 % воды, вследствие его окисления, воды приобретают кислую реакцию (рН 2–3) и сульфатный состав. Сульфатные железисто-алюминиевые, натриево-кальциевые воды имеют минерализацию 2,5-19 г/л. В ходе эксплуатации месторождения, в связи с увеличением водопритоков, воздухообмена и объема пород, вовлеченных в геохимические процессы, минерализация шахтных вод может возрастать. В кислой шахтной воде по сравнению с природной на несколько порядков повышается содержание свинца, меди, цинка, серебра, никеля, кобальта и др.

При работе бассейна шахтные воды объемом до 100 млн.м³ без очистки сбрасывались в местную гидросеть. Реки до сброса в них шахтных вод имели гидрокарбонатно-кальциево-натриевую гидрохимическую фацию, минерализацию 90-150 мг/л и близкую к нейтральной реакцию среды. Ниже по течению от сброса шахтных вод они приобретают сульфатный железисто-алюминиевый состав при минерализации от 640 до 6000 мг/л. Содержание сульфатов составляет до 3700, железа – до 900, алюминия – до 160 мг/л, рН 2,5–2,9 при высоком содержании тяжелых металлов (Maksimovich, 2006).

Ликвидация шахт в период 1990-х гг. не решила экологических проблем. Откачка кислых шахтных вод на поверхность была прекращена. Шахтные воды затопленных горных выработок смешивались с подземными водами и сформировали техногенные водоносные горизонты мощностью 25-30 м (Имайкин и др., 2002). После восстановления уровня

подземных вод в течение нескольких лет сформировался самопроизвольный излив шахтных вод. По данным некоторых авторов качество воды изливов на протяжении 20-40 лет может как улучшаться, так и оставаться неизменным (Demchak et al., 2004).

В настоящее время существуют более 14 участков самоизлива шахтных вод на поверхность. Общий объем излива в 2013 г. составил 14,5 млн.м³ (Доклад о состоянии ..., 2014), что в 5-6 раз меньше, чем в период работы угольного бассейна. Изливы остались мощным источником загрязнения поверхностных вод. Сохраняются высокие концентрации двухвалентного железа (3,6 г/л), алюминия (157мг/л), марганца (35 мг/л), рН изменяется от 2,4 до 3,9.

Воздействие самоизливов на поверхностные воды приобрело региональный масштаб. При смешении с речными водами и увеличением рН, Fe²⁺ дольше, чем Fe³⁺ преобразуется в осадок, что привело к загрязнению рек на протяжении десятков километров. Этого не наблюдалось при работе шахт. Воды самоизливов поступают в 19 рек, 15 из которых практически выведены из водопользования. В р. Кизел (приток р. Вильва), испытывающего наибольшее влияние шахтных вод, среднегодовое содержание железа составляет 1178 ПДК, среднегодовое содержание марганца – 50 ПДК, алюминия – 45 ПДК, бериллия – 58 ПДК, концентрации никеля, меди и цинка так же превышает ПДК (Доклад о состоянии ..., 2014). Даже для крупных рек, таких как р. Косьва и р. Вильва, постоянно наблюдаются высокие и экстремально-высокие уровни загрязнения воды по концентрации общего железа. Поступление загрязнителей в реки региона за счет самоизлива шахтных вод имеет тенденцию к увеличению.

По данным обследования 2010 г. среднегодовые концентрации по железу общему в р. Вильва составили 197 ПДК, возрастая зимой до 468 ПДК, марганцу – 37 ПДК, никелю и меди – 2 ПДК. Среднегодовые концентрации на р. Косьва по железу общему составили 43 ПДК, марганцу – 18 ПДК. В р. Косьва индекс загрязненности воды соответствует 7 классу качества – «вода чрезвычайно грязная» (Материалы сборника «Состояние и охрана окружающей среды, 2010).

В конце 1980-х годов автором было предложено использовать в качестве реагента для очистки шахтных вод щелочные отходы содового производства, миллионы тонн которых накопились и продолжают поступать в расположенные в относительной близости шламонакопитель ОАО «Березниковский содовый завод» (БСЗ). Утилизация этих отходов уже в то время представляла серьезную проблему. Проведенные в те годы лабораторные эксперименты показали высокую эффективность этого реагента, причем его можно было использовать без специфической подготовки.

Позднее для очистки кислых шахтных вод была реализована простая технологическая схема. Реагент добавляется в поток изливающейся шахтной воды, а образующийся осадок собирается в каскаде отстойников. Совместно с А.Б. Холостовым и В.Н. Басовым была разработана специальная установка, позволяющая готовить пульпу определенной концентрации из отходов БСЗ и шахтной воды и выливать ее непосредственно в канал стока самоизлива в рассчитанных количествах в зависимости от расхода и состава воды (рисунок 3) (Пат. 2293063).

Отходы БСЗ относятся к 5 классу опасности. Оптимальными для нейтрализации составом и свойствами обладает шлам верхнего 1,5 м слоя старой карты шламонакопителя (рисунок 4). Он более чем на 90 % состоит из тонкодисперсного карбоната кальция. Водородный показатель вытяжки составляет 9–12. Вследствие промывания атмосферными осадками, содержание водорастворимых хлоридов, сульфатов, натрия в этом слое в 37–54 раза ниже, чем в действующей карте. Содержание 38 определенных спектральным анализом микроэлементов не превышает ПДК валового содержания в почвах. Вредных органических примесей в шламе не обнаружено. Объем шлама готового к использованию в качестве реагента для очистки шахтных вод без какой-либо подготовки превышает 1 млн. м³.

При смешивании шахтной воды со шламами БСЗ происходит повышение рН за счет взаимодействия с карбонатом и гидроксидом кальция, которые являются основными

компонентами отходов БСЗ. При этом происходит очистка воды от ряда загрязнителей, которые хорошо мигрируют в кислой среде и малоподвижны в нейтральной и щелочной. К ним относятся Fe, Al, Mn, Co, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, Ti и др. При повышении pH растворов, в которых присутствуют ионы этих металлов, происходит их осаждение. Испытания проводились на самоизливе воды из штольни шахты «им. 40 лет Октября». В период летней межени расход самоизлива составляет 180–220 м³/час, в период паводков – 300-400 м³/час.

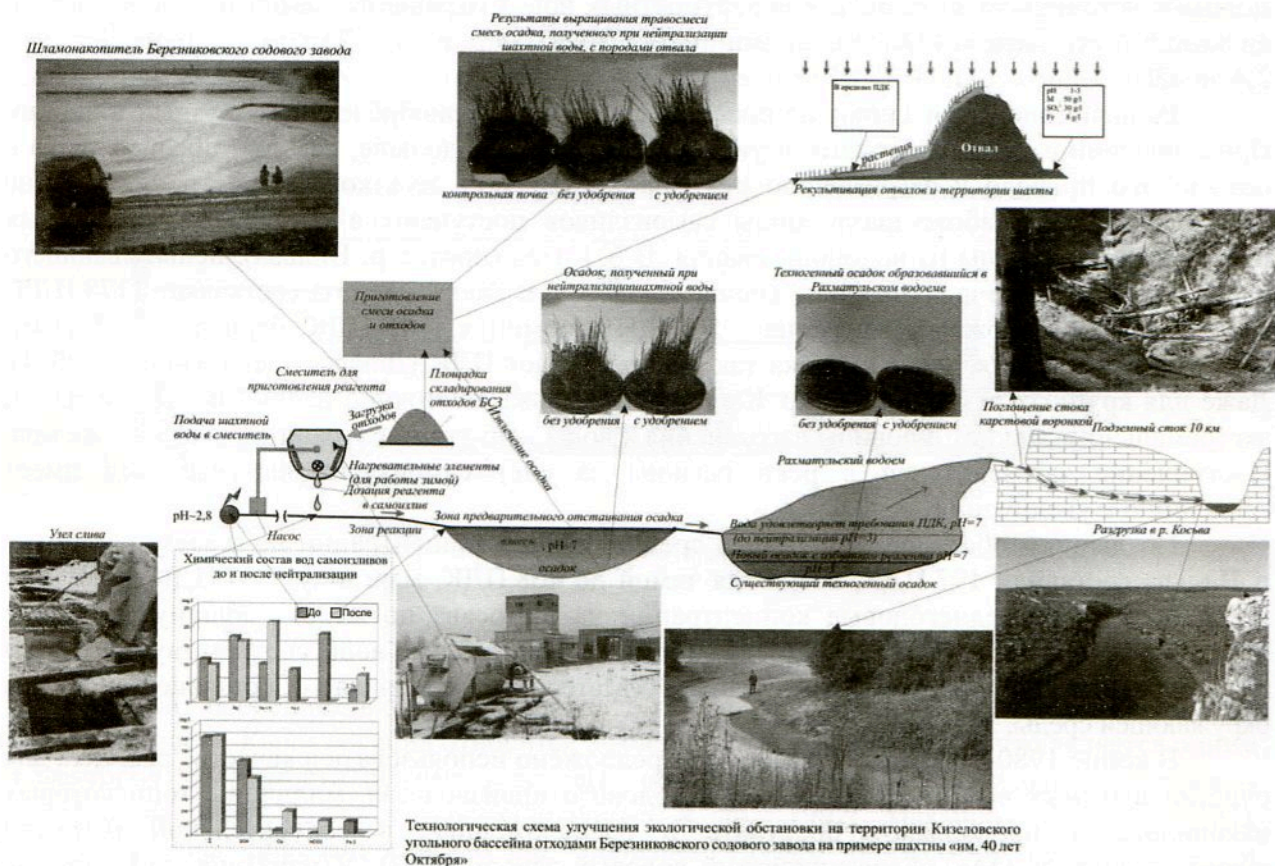


Рисунок 3 - Общая технологическая схема улучшения экологической обстановки на территории Кизеловского угольного бассейна с использованием отходов БСЗ на примере шахты «им. 40 лет Октября»

Водородный показатель составляет 2,6-2,9. Минерализация изменяется от 400-600 мг/л в периоды паводков до 800-900 мг/л в период летней межени. Максимальное превышение ПДК_в для железа – в 400, для алюминия – в 46 и для сульфатов – в 1,3 раза. Превышение ПДК_в для бериллия составляет 52,8, марганца – 36,9, лития – 3,5, никеля – 2,5, кадмия – 1,9, кобальта – 1,6, бария – 1,5 и титана – 1,2 раза.

В результате применения метода pH шахтной воды повышается с 2,6–2,9 до нейтральных значений. В ходе испытаний суммарное содержание железа снизилось с 30–40 до 0,2–0,3 мг/л, что не превышает ПДК. После нейтрализации алюминия в шахтной воде не обнаружено, тогда как до нейтрализации его содержание составляло 10–14 мг/л. Содержание бериллия, лития, никеля, кадмия, кобальта и титана, которые в шахтных водах превышали нормативные концентрации, снижается до значений не превышающих ПДК. Нейтрализованная вода после отстаивания удовлетворяет требованиям ПДК (рисунок 5). Очистка воды от взвешенных частиц производится в каскаде отстойников.

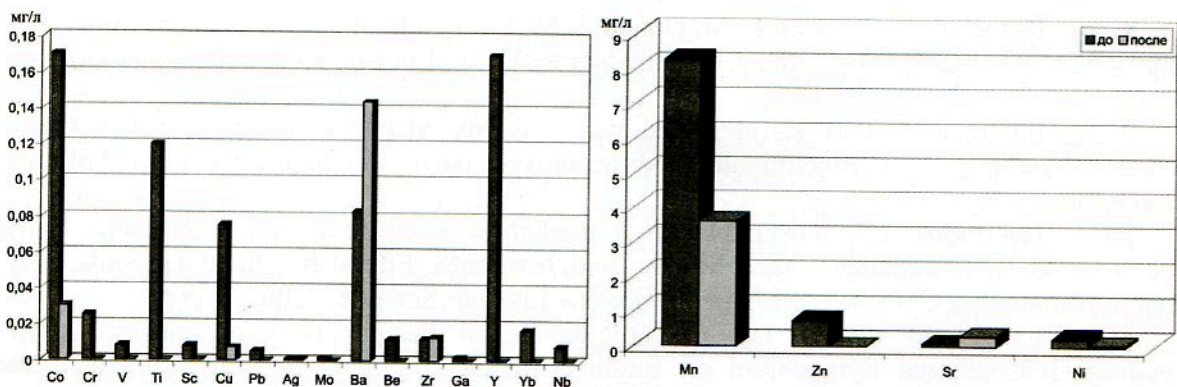


Рисунок 5 - Микроэлементный состав воды самоизлива шахты «им. 40 лет Октября» до и после опытно-промышленной очистки отходами БСЗ

Образующийся осадок представляет смесь тонкодисперсных частиц гидроксидов железа и гипса, частично не прореагировавшего карбоната кальция. Он имеет нейтральную реакцию среды. Подвижных форм железа, алюминия, марганца, свинца и др. практически не обнаружено, т.е. он не является источником вторичного загрязнения водных объектов (Maksimovich, Khaygulina, 2014).

Эксперименты с образующимся в результате нейтрализации осадком (В.И. Каменщикова и др.) показали, что он зарастает многолетними травами (timoфеевка, овсяница, пырей, люцерна) практически также, как и контрольные образцы почвы. Осадок предполагается использовать для рекультивации шахтных отвалов.

Дополнительным плюсом данного метода является использование для очистки шахтных вод отходов содового производства, утилизация которых представляет серьезную проблему.

Таким образом, проведение опытно-промышленных испытаний показали простоту и высокую эффективность использования геохимических барьеров для комплексного решения экологических проблем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-05-07461.

Литература

- 1 Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. – Пермь, 1992. –200 с.
- 2 Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2013 году». –Пермь: Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края., 2014 – С. 264.
- 3 Имайкин К.К., Баньковская В.М., Бурковская А.В. Изменение гидрогеологической обстановки при ликвидации шахт Кизеловского угольного бассейна // Гидрогеология и карстоведение. Вып.14. Пермь: Перм. ун-т, 2002. –С. 145- 150.
- 4 Максимович Н.Г. Теоретические и прикладные аспекты использования геохимических барьеров для охраны окружающей среды // Инженерная геология. 2010. № 3. С. 20-28.
- 5 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>.
- 6 Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Геохимия элементов / В.Р. Клер, Г.А. Волокова, Е.М. Гурвич и др. М.: Наука, 1987. –240 с.
- 7 Пат. 2293063 Российская Федерация, Способ нейтрализации кислых шахтных вод и установка для его осуществления / Максимович Н.Г., Басов В.Н., Холостов С.Б.; опубли. 10.02.07 №4, Бюл. №4.Изобретения Полезные модели. – 350 с.

- 8 Demchak J., Skousen J., McDonald L.M. Longevity of acid discharges from underground mines located above the regional water table // *J. Environ. Qual.* 2004. Mar-Apr; 33 (2): 656-668.
- 9 Förstner U. Part I: Integrated water quality management: river basin approach. Geochemical techniques on contaminated sediments-river basin view // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2003;10(1). – P. 58-68.
- 10 Handbook of Groundwater Remediation using Permeable Reactive Barriers. Applications to Radionuclides, Trace Metals, and Nutrients/ Edited by:David L. Naftz, Stan J. Morrison, Christopher C. Fuller and James A. Davis- Elsevier Science – 2002, 539 p.
- 11 Langer M (2001) The role of geological barrier in waste disposal projects. Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens, Greece, 23-27 June 1997. A.A.Balkema: 3617 – 3635.
- 12 Maximovich N., Khayrulina E. Artificial geochemical barriers for environmental improvement in a coal basin region // *Environmental Earth Sciences.* № 72. 2014. – P. 1915-1924.
- 13 Maximovich N.G., Kataev V.N., Blinov S.M. Consequence of the Kizel coalfield acid mine water disposal into karst cavities // *Proceeding of the 8th Int. Symposium on Water-rock Interaction-WRI-8.* Russia. Vladivostok,1995.-P.885-888.
- 14 Maximovich N.G., Osovetskiy B.M., Blinov S.M. Geochemical Barriers and Environment Protection // *GeoEng 2000: Conference Proceedings.* 19-24 November 2000. Melbourne, Australia.
- 15 Palmer C.D., Wittbrodt P.R. Processes affecting the remediation of chromium-contaminated sites // *Environmental Health perspectives.* Vol. 92, pp 25-40, 1991.
- 16 Perel'man A. I. (1986) Geochemical barriers: theory and practical applications. *Applied Geochemistry.* Vol. 1, Is. 6. – P 669–680.

References

- 1 Gorbunova K.A., Andrejchuk V.N., Kostarev V.P., Maksimovich N.G. Karst i peshhery Permskoj oblasti. – Perm', 1992. –200 s.
- 2 Doklad «O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy Permskogo kraja v 2013 godu». –Perm': Ministerstvo prirodnyh resursov, lesnogo hozjajstva i jekologii Permskogo kraja., 2014 – S. 264.
- 3 Imajkin K.K., Ban'kovskaja V.M., Burkovskaja A.V. Izmenenie gidrogeologicheskoj obstanovki pri likvidacii shaft Kizelovskogo ugol'nogo bassejna // *Gidrogeologija i karstovedenie.* Vyp.14. Perm': Perm. un-t, 2002. –S. 145- 150.
- 4 Maksimovich N.G. Teoreticheskie i prikladnye aspekty ispol'zovanija geohimicheskikh bar'erov dlja ohrany okruzhajushhej sredy // *Inzhenernaja geologija.* 2010. № 3. S. 20-28.
- 5 Materialy sbornika «Sostojanie i ohrana okruzhajushhej sredy Permskogo kraja v 2010 godu» / Ezhegodnyj jekologicheskij doklad-2010 // Oficial'nyj sajt «Priroda Permskogo kraja». 2010. URL: <http://www.permecology.ru/reports2010.php>.
- 6 Metallogenija i geohimija ugljosnyh i slancesoderzhashhih tolshh SSSR. Geohimija jelementov / V.R. Kler, G.A. Volokova, E.M. Gurvich i dr. M.: Nauka, 1987. –240 s.
- 7 Pat. 2293063 Rossijskaja Federacija, Sposob nejtralizacii kislyh shaftnyh vod i ustanovka dlja ego osushhestvlenija / Maksimovich N.G., Basov V.N., Holostov S.B.; opubl. 10.02.07 №4, Bjul. №4.Izobretenija Poleznye modeli. – 350 c.
- 8 Demchak J., Skousen J., McDonald L.M. Longevity of acid discharges from underground mines located above the regional water table // *J. Environ. Qual.* 2004. Mar-Apr; 33 (2): 656-668.
- 9 Förstner U. Part I: Integrated water quality management: river basin approach. Geochemical techniques on contaminated sediments-river basin view // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2003;10(1). – P. 58-68.
- 10 Handbook of Groundwater Remediation using Permeable Reactive Barriers. Applications to Radionuclides, Trace Metals, and Nutrients/ Edited by:David L. Naftz, Stan J. Morrison, Christopher C. Fuller and James A. Davis- Elsevier Science – 2002, 539 p.

- 11 Langer M (2001) The role of geological barrier in waste disposal projects. Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens, Greece, 23-27 June 1997. A.A.Balkema: 3617 – 3635.
- 12 Maximovich N., Khayrulina E. Artificial geochemical barriers for environmental improvement in a coal basin region // Environmental Earth Sciences. № 72. 2014. – P. 1915-1924.
- 13 Maximovich N.G., Kataev V.N., Blinov S.M. Consequence of the Kizel coalfield acid mine water disposal into karst cavities // Proceeding of the 8th Int. Symposium on Water-rock Interaction-WRI-8. Russia. Vladivostok, 1995.-P.885-888.
- 14 Maximovich N.G., Osovetskiy B.M., Blinov S.M. Geochemical Barriers and Environment Protection // GeoEng 2000: Conference Proceedings. 19-24 November 2000. Melbourne, Australia.
- 15 Palmer C.D., Wittbrodt P.R. Processes affecting the remediation of chromium-contaminated sites // Environmental Health perspectives. Vol. 92, pp 25-40, 1991.
- 16 Perel'man A. I. (1986) Geochemical barriers: theory and practical applications. Applied Geochemistry. Vol. 1, Is. 6. – P 669–680.

ӘОЖ 622.85:622.51:628.33

Резюме

Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А.
(Пермьдік мемлекеттік ұлттық зерттеу университетінің
жаратылыстану-ғылыми институты, Пермь қ., Ресей)

ЖЕР ҚОЙНАУЫН РАЦИОНАЛДЫ ПАЙДАЛАНУ ЖӘНЕ ГЕОХИМИЯЛЫҚ БАРЬЕРЛЕР

Қоршаған ортаға әсер ететін тау-кен өндірісін зиянын азайту үшін өзінің экономикалық және жоғары тиімділікті дәстүрлі әдісімен ерекшелінетін жасанды геохимиялық барьерлер ұсынылған. Кизелов көмір бассейнінің (Пермь өңірі) 1997-2002 жж. шахталары жойылған, шахтада өздігінен пада болатын қышқыл судың қоршаған ортаға тигізетін зиянын тазалау мәселесі қарастырылған және пайда болатын қышқыл суды сода өндірісінің қалдықтарымен тазалау тиімді әдісі ұсынылған. Осы орайда пайда болған тұнбаны шахта үйінділерін рекультивациялауға қолдануға болады.

Түйінді сөздер: геохимиялық кедергілер, көмір кенорны, қышқыл шахта сулары, сода өндірісінің қалдықтары.

UDC 622.85:622.51:628.33

Summary

Maksimovich N.G., Khayrullina E.A.
(Natural-science institute of the Perm state national research university, Perm, Russia)

GEOCHEMICAL BARRIERS AND RATIONAL SUBSURFACE USE

To reduce the negative mining impact on the environment a method of creating artificial geochemical barriers was provided, this method differs from the traditional methods by high efficiency and profitability. For example Kizel coal basin (Perm Krai), mines of which were liquidated in 1997-2002, the problem of environmental pollution by acid mine discharges was considered and an effective method for purifying waste water by soda production was proposed. The resulting precipitate can be used for bioremediation of mine dumps.

Keywords: geochemical barriers, coal basin, acid mine discharges, soda production waste.