

Экологические последствия ликвидации Кизеловского угольного бассейна
Н.Г. Максимович, Н.В. Черемных, Е.А. Хайрулина
ФГНУ «Естественно-научный институт», г. Пермь

Ликвидация шахт Кизеловского угольного бассейна, связанная с отработкой большей части запасов угля и дальнейшей нерентабельностью их разработки, привела к обострению ряда экологических проблем, которые были предопределены особенностями геологического строения и геохимией угленосной толщи. Экологическая ситуация, сложившаяся в бассейне, является одной из наиболее острых в России.

Геологические условия. Кизеловский каменноугольный бассейн площадью 200 км² расположен в пределах Западно-Уральской зоны складчатости, прилегающей к Предуральскому краевому прогибу. Преобладающей формой тектоники района являются складки меридионального и близкого к нему простирания, иногда вытянутые на десятки километров, осложненные многочисленными разрывными нарушениями, которые в большинстве случаев имеют простирание, согласное с простиранием складчатости. В районе исследований развиты породы палеозойского (от среднедевонского до позднепермского) возраста, представленные песчаниками, аргиллитами, алевролитами, сланцами, известняками, доломитами, мергелями, углем и другими, общей мощностью до 3-4 км. Карбонатные породы интенсивно закарстованы, особенно в верхней части разреза. Четвертичные отложения представлены в основном песками, суглинками, глинами, часто с большим содержанием гравия и гальки.

Угленосная толща, сложенная песчаниками, алевролитами, аргиллитами и глинистыми сланцами с прослоями известняков, относится к визейскому ярусу нижнего карбона. Все литологические разновидности пород угольной толщи включают пирит и органическую серу, что играет важнейшую роль в формировании кислых шахтных вод. Содержание сульфидной и органической серы достигает 12 – 15%, при среднем уровне 5 – 8% [1, 2]. Основной формой нахождения серы является пирит, который неустойчив в окислительных условиях.

Кизеловский каменноугольный бассейн расположен на площади распространения подземных вод зон трещиноватости в породах верхнего и среднего палеозоя Западно-Уральской зоны складчатости [3]. Здесь выделяются подземные воды четвертичных отложений, подземные воды трещинно-карстового и трещинно-пластового типов [4]. Разрабатываемая угленосная толща расположена между водоносными комплексами трещинно-карстовых вод карбонатных отложений, что обусловило высокую обводненность угольных шахт.

Угли Кизеловского бассейна весьма насыщены микроэлементами. Среднее содержание в них Be, Sc, Ti, V, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, Y, Zr, Ag превышает их среднее содержание для углей в СНГ.

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 [5].

Приуроченность Кизеловского бассейна к геосинклинальной зоне обуславливает гидродинамическую активность подземных вод, которые представлены здесь двумя горизонтами: верхним – в карбонатных породах, перекрывающих угленосную формацию, и нижним – в породах угленосной формации, залегающей на глубине 600 – 900 м. Подземные воды верхнего горизонта имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав, минерализацию около 1,5 г/л, нижнего горизонта – гидрокарбонатно-натриевый состав и минерализацию 1,5 г/л.

Режим поверхностных водотоков в значительной степени зависит от режима атмосферных осадков. В полной мере это относится к относительно крупным водотокам, поскольку сформировавшийся в их долинах аллювий изолирует воды от трещиноватого цоколя. Валунно-галечниковый аллювий с песчано-глинистым заполнителем и слоями песчанистой глины (до 4,0 м) в кровле и подошве является надежным экраном. В условиях искусственного понижения уровня подземных вод реки оказываются подвешенными, изолированными от подземных вод. Малые реки, протекающие по территории распространения закарстованных пород, отличаются сменой поверхностного стока на подземный и наоборот. Карстовые потоки со смешанным атмосферным и подземным питанием, разгрузкой в виде источников в крупные реки являются важным звеном в гидродинамической системе карстового массива в частности и экологической системе региона в целом. Естественный состав поверхностных вод характеризуется $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ гидрохимической фацией и невысокой минерализацией – 0,1 – 0,3 г/л.

В естественных условиях гидрохимический и гидрологический режимы поверхностных вод во многом определялись их взаимосвязью с водоносным комплексом карстующихся отложений нижней перми – среднего карбона (верхней карбонатной обводненной толщи). Значительная закарстованность территории обуславливает понижение уровня подземных вод по отношению к руслам мелких боковых притоков, что привело к поглощению поверхностного стока и образованию суходолов на реках.

Проблемы в период эксплуатации бассейна. Шахты Кизеловского бассейна в период эксплуатации были одними из самых обводненных в стране. В силу особенностей геолого-гидрогеологических условий территории они имели значительные водопритоки. В период эксплуатации шахты ежегодно сбрасывали в реки практически без очистки около 100 млн. м³ загрязненных шахтных вод, содержащих большое количество сульфатов, железа, алюминия. Средний суммарный водоприток в шахты в период их работы составлял 12 – 14 тыс. м³/ч. Главную роль в формировании шахтных водопритоков играли карстовые воды визейского водоносного комплекса, которые поступали в горные выработки по техногенным трещинам, из зон крупных тектонических нарушений, по выработкам, вскрывшим водоносные горизонты.

Химический состав шахтных вод зависит в основном от гидродинамических условий, содержания в угленосной формации серы, карбонатов и рассеянных элементов. Если содержание серы в углях превышает 4%, то в результате окисления сульфидов вода приобретает кислую реакцию (рН=2 – 3) и сульфатный состав. Трещинно-карстовые воды карбонатных пород, обладающие высоким окислительным потенциалом, нейтральной средой (рН=7,3 – 7,5), гидрокарбонатно-кальциевым составом и минерализацией 0,06 – 1,5 г/л взаимодействуют в шахтах с богатыми серой угленосными породами и преобразуются в сульфатные железисто-алюминиевые натриево-кальциевые воды с минерализацией 2,5 – 19 г/л (табл.1). В ходе эксплуатации она возрастает до 35 г/л.

Для кислых шахтных вод характерны высокие содержания цинка, никеля, меди, свинца, марганца, кобальта, стронция и других микроэлементов (табл.2) [6, 7].

Постоянный и интенсивный сток шахтных вод привел к тому, что химический состав рек в период эксплуатации шахт приблизился к химическому составу шахтных вод. Малые реки до впадения в них шахтных вод имели $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ гидрохимическую фацию, минерализацию 90 – 150 мг/л и близкую к нейтральной реакцию среды. Ниже по течению стока шахтных вод они приобретают сульфатный железисто-алюминиевый состав при минерализации от 640 до 6000 мг/л. Содержание сульфатов составляет от 1000 до 3700, железа – от 70 до 900, алюминия – от 11 до 160 мг/л при рН 2,5 – 2,9.

При эксплуатации шахт естественный гидродинамический режим подземных вод претерпевал значительные изменения. Водоносные горизонты, оказавшиеся в сфере влияния горных выработок, испытывали дренирующее влияние шахт. Дренирование водоносных горизонтов происходило по естественным и техногенным трещинам. В ряде случаев подземные воды поступали непосредственно в горные выработки, вскрывшие водоносные

горизонты. Движение подземных вод было направлено в сторону горных работ, имевших более низкие отметки, чем естественные дрены. Уровни подземных вод снизились до нескольких сотен метров от поверхности земли, что привело к истощению водоносных горизонтов. Наибольшему истощению подвергались подземные воды визейского (нижнего надугольного водоносного горизонта). При затоплении шахт наблюдается существенное изменение гидродинамического режима подземных вод, сформировавшегося в процессе эксплуатации угледобывающих предприятий. Происходит восстановление сработанных ранее уровней подземных водоносных комплексов. Затопление шахт происходит за счет подземных вод трещинно-карстовых водоносных горизонтов и сопровождается восстановлением их уровней [8].

Сброс шахтных вод в карстовые долины приводил к временному затуханию карстовых процессов в донной части суходолов и увеличению зоны поверхностного стока от верховьев к устьям. В результате сброса изменялся состав воды крупных рек. Так, для р. Косьвы ниже г. Губахи были характерны повышенная минерализация, увеличение содержания сульфатов и значения pH – 4-6.

Проблемы, возникшие после ликвидации шахт. После закрытия и ликвидации шахтного водоотлива горные выработки стали затапливаться, и на ряде шахт происходит самоизлив шахтных вод на земную поверхность. Величина самоизлива из затопленных шахт составляет от 20 до 80% объема шахтных вод во время эксплуатации. На территории шахтных полей в результате затопления шахт образуются техногенные водоносные горизонты шахтных вод. Область распространения техногенных водоносных горизонтов зависит от объемов затопления отработанных шахтных полей. В ряде случаев максимальные отметки затопления горных выработок могут оказываться выше статического уровня подземных вод, вследствие этого на участках гидравлической связи между шахтными и подземными водами будет происходить движение шахтных вод из горных выработок в водоносные горизонты, загрязняя последние.

В связи с формированием шахтного самоизлива резко ухудшилась экологическая обстановка в регионе. Это связано с изменением состава шахтных вод и значительным увеличением концентрации загрязнителей. В начальный период затопления шахт происходит повышение минерализации и концентраций основных загрязняющих компонентов в шахтных водах, растет их кислотность. В последующем происходит постепенное снижение загрязнения. Шахты закрывались и затапливались в разное время и продолжительность излива воды из них разная, соответственно стабилизация химического состава шахтных вод происходит не одновременно. Процесс этот длительный, так, на шахтах, где самоизливы происходят уже 40 лет, воды остаются кислыми и загрязненными.

В начале излива шахтных вод их загрязненность обычно возрастает. После полного затопления шахт резко снижается поступление кислорода в горные выработки, что сопровождается замедлением процессов разложения пирита и образования сульфатов, железа, алюминия. В процессе водообмена загрязненные шахтные воды постепенно вытесняются менее загрязненными. Происходит снижение концентрации основных загрязняющих компонентов, сменяющееся стабилизацией химического состава шахтных вод на уровне более низком, чем в период эксплуатации.

Установлено, что давно закрытые шахты имеют в настоящее время на изливе воду с меньшей концентрацией загрязняющих веществ, чем в период их эксплуатации. В недавно закрытых шахтах отмечается значительное содержание загрязняющих веществ (сульфатов, железа, алюминия, ряда микрокомпонентов), превышающее не только ПДК, но и их значения в период работы [8].

В настоящее время существует более 12 участков самоизлива шахтных вод на поверхность. Их суммарный среднегодовой расход составляет около 2,5 тыс. м³/ч, что в несколько раз меньше, чем в период работы бассейна. Однако значительно увеличилась их минерализация – до 25 г/л и более, химический состав изменился в худшую (с эко-

логической точки зрения) сторону (рисунок). Произошло резкое увеличение концентрации железа – до 5 г/л. При смешивании с речными водами и увеличением pH, Fe^{2+} дольше, чем Fe^{3+} преобразуется в осадок, что привело к значительному загрязнению рек – на протяжении десятков километров до самых устьев. На загрязняемых участках рек ежедневно формируется около 80 т техногенных донных осадков, представленных аморфными

Таблица 1

Химический состав подземных и шахтных вод Кизеловского угольного бассейна, мг/л [1]

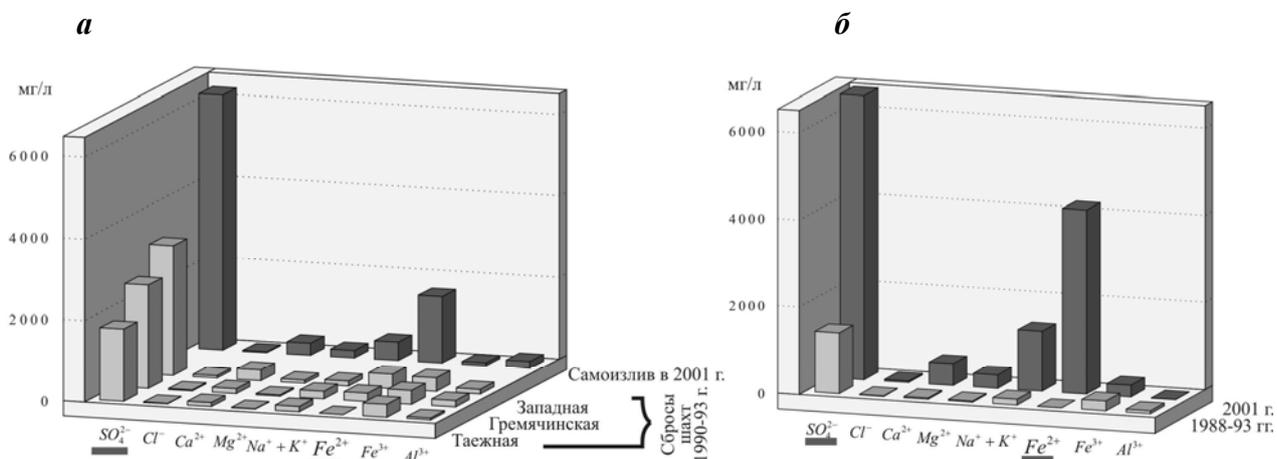
Воды	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	Al^{3+}	pH	Минерализация
Подземные	12-280	2-99	2-44	4-148	0,5-24	0,5-10	нет	нет	7,3-7,5	60-1500
Шахтные	нет	644-6174	7-74	40-243	17-115	115-629	131-3727	29-494	2,2-3,1	2500-19000

Таблица 2

Микроэлементный состав подземных и шахтных вод Кизеловского угольного бассейна, мг/л [6, 7]

Воды	Pb	Cu	Zn	Ag	Ni	Co	Mo	V	Cr	Ba	Sr	Ti	Mn
Подземные	0,0017	0,003	0,0079	0,00052	0,0071	0,00064	0,0001	0,0029	0,0016	0,053	0,061	0,053	0,074
Шахтные	0,003-0,022	0,048-0,56	0,63-1,10	0,010-0,027	0,036-3,89	0,067-2,88	0,005-0,010	0,18-0,25	0,025-0,102	нет	2,7-9,2	0,28-0,91	0,65-33,0

гидроксидами железа и алюминия, с высоким содержанием Mn, Cu, Ni, Zn, Pb, Cd и др. При смыве в Камское водохранилище и р. Чусовую они являются вторичным источником загрязнения рек, что представляет угрозу для централизованного питьевого водоснабжения. Уже в настоящее время фиксируются превышения ПДК по концентрации Fe на водозаборе Верхнечусовских Городков, чего не наблюдалось при работе бассейна. Сложившаяся экологическая обстановка требует принятия незамедлительных природоохранных мер по очистке шахтных вод.



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

В современных условиях отдельные реки-приемники шахтных вод загрязняются более интенсивно и на большем протяжении, чем при работе угольных шахт.

При разработке угольных месторождений существенное влияние на окружающую среду оказывает складирование твердых отходов угледобычи. Влияние отвалов шахт на химический состав подземных вод прилегающих территорий проявилось в увеличении концентрации некоторых химических компонентов относительно их фоновых значений, характерных для природного состава подземных вод [9]. В более чем 70 отвалах Кизеловского угольного бассейна складировано свыше 35 млн. м³ вмещающих пород, половина которых – неперегоревшие [10]. Породы, поступающие в отвал, образуются за счет проходки выработок (52%), их ремонта и восстановления (48%). В литологическом отношении отвалы представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, углем и другими породами. В них присутствуют древесина, металлические предметы [11, 12]. Породы неоднородны по гранулометрическому составу, имеют размер от глинистых частиц до глыб. Они складываются в виде терриконов высотой до 80 м, хребтовидных и плоских отвалов. Площадь зоны влияния отвала в несколько раз превышает площадь самого отвала.

Содержание сульфидной серы в отвалах Кизеловского угольного бассейна 5 – 50-летнего возраста изменяется от 3,5 до 8%. Характерной реакцией, протекающей в отвалах, является окисление органической серы и пирита в сульфаты. Реакции окисления идут с выделением тепла и сопровождаются самовозгоранием отвалов, обжигом, переплавлением минералов, фумарольными процессами. Горение отвалов продолжается несколько лет.

Основной геохимической особенностью пород отвалов Кизеловского бассейна, определяющей их неустойчивость в условиях земной поверхности, является высокое содержание различных форм серы. Она входит непосредственно в состав углей месторождения, а также представлена в виде сульфидов металлов, преимущественно пирита [1]. В породах отвалов протекают процессы физического выветривания, окисления, гидролиза, гидратации, метасоматоза.

Компоненты отвалов участвуют в биологическом круговороте элементов. Существенное значение при выветривании их пород имеют микробиологические процессы. Значительную роль в процессах окисления играют тионовые бактерии.

Инфильтрация богатых растворенным кислородом атмосферных осадков через отвалы угольных шахт приводит к активизации серно-кислотного процесса. Снижается рН фильтрующихся вод, в процесс водной миграции вовлекаются сера (сульфаты), железо, алюминий, тяжелые металлы.

Наиболее опасные загрязнители окружающей среды – горящие и перегоревшие породные отвалы, в которых под действием высоких температур процессы окисления идут интенсивнее. В водных вытяжках из грунтов этих отвалов содержание сульфат-иона колеблется от 1,0 до 15 г/л, отмечены повышенные концентрации Fe^{2+} (до 0,2 г/л); Fe^{3+} (до 0,5 г/л); алюминия.

Взаимодействие породных отвалов с атмосферными осадками приводит к инфильтрации загрязненных осадков в зону аэрации или поступлению их в гидрографическую сеть. Дождевые и талые воды, фильтрующиеся через толщу отвалов и стекающие по их поверхности, обогащаются растворимыми соединениями и формируют техногенные геохимические потоки, которые переносят от отвалов большое количество коллоидных соединений и механических взвесей, среди которых значительную роль играют соединения серы. Кроме серы, основными загрязняющими компонентами являются взвешенные вещества – до 324 мг/дм³, алюминий – до 1,6 г/л, железо – до 7,2 г/л.

В зависимости от рельефа и геолого-гидрогеологических условий участков складирования часть этих вод в период снеготаяния и обильных атмосферных осадков образует поверхностный сток в виде временных водотоков от отвалов, загрязняющий поверхностные воды. Водородный показатель таких временных водотоков чаще всего менее 3. Воды имеют высокую минерализацию (иногда до 45 г/л) и повышенное содержание характерных для серно-кислотного процесса микроэлементов.

Отвалы угольных шахт влияют на состав донных отложений за счет кислых стоков и размыва пород, особенно при складировании по берегам рек. В грубообломочной, песчаной и алевритовой фракциях донных отложений ниже участков складирования содержится значительное количество угольно-породных частиц (до 22%) и других техногенных включений. Образующиеся техногенные осадки в виде взвешенных веществ мигрируют вниз по течению и являются источником вторичного загрязнения рек. Особенно интенсивно смыв происходит в паводковый период. Наблюдающиеся процессы представляют реальную угрозу для качества воды в Камском водохранилище и р. Чусовой, так как в настоящее время загрязнение зафиксировано на приустьевых участках притоков. Донные отложения наиболее загрязнены на участках ниже самоизливов: р. Вильва – ниже г. Гремячинска до устья (далее загрязняются р. Усьва и Чусовая), р. Косьва – ниже г. Губахи до устья, р. Кизел и Вильва – ниже г. Кизела до устья (далее загрязняется р. Яйва).

Пути улучшения экологической обстановки. Лаборатория геологии техногенных процессов Естественного научного института на протяжении последних лет разрабатывает теоретические основы и практические способы решения экологических проблем. Одним из методов уменьшения негативных последствий самоизливов кислых шахтных вод является применение искусственных геохимических барьеров. Для очистки шахтных вод в природных условиях предлагается использовать отходы содового производства [13, 14]. Исследования показали, что при использовании щелочных отходов рН шахтных вод можно повышать до нейтральных значений. При этом содержание других загрязнителей уменьшается до допустимых концентраций.

Для снижения негативного влияния породных отвалов на состояние окружающей среды в угольной промышленности наиболее распространено озеленение шахтных терриконов. Известны способы микробиологической рекультивации отвалов [15]. Однако для Кизеловского угольного бассейна в условиях интенсивного развития серно-кислотного процесса эти способы требуют дополнительных мер. В первую очередь необходимы

мероприятия по уменьшению кислотности среды, а также локализации распространения загрязнителей с поверхностным стоком и подземными водами.

Для нормализации состава подземных вод в районах отвалов в качестве реагента предложено использовать соединения бария, а также дробленые карбонатные породы, укладываемые в траншеи в зоне стока с отвалов. Карбонатные породы в пределах главной Кизеловской антиклинали (и других геоструктур бассейна) имеют достаточно широкое распространение. На территории региона есть ряд крупных карьеров, добывающих известняк, поэтому его использование в качестве реагента обходилось бы относительно дешево [16].

Библиографический список

1. *Металлогения* и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Закономерности концентрации элементов и методы их изучения / В.Р. Клер, В.Ф. Неханова, Ф.Я. Сапрыкин и др. М.: Наука, 1988. 256 с.
2. *Металлогения* и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Геохимия элементов / В.Р. Клер, Г.А. Волкова, Е.М. Гурвич и др. М.: Наука, 1987. 240 с.
3. *Гидрогеология СССР*. Т. XIV. Урал. М.: Недра, 1972. 648 с.
4. *Печеркин И. А.* Подземные и шахтные воды Кизеловского карстового района / И.А. Печеркин, Г.И. Карзенков. М.: Наука, 1964. 102 с.
5. *Горбунова К.А.* Карст и Пещеры Пермской области / К.А. Горбунова, В.Н. Андрейчук, В.П. Костарев, Н.Г. Максимович. Пермь, 1992. 200 с.
6. *Максимович Н.Г.* Геохимия угольных месторождений и окружающая среда / Н.Г. Максимович // Вестник Перм. ун-та. 1997. Вып.4. Геология. С. 171 – 186.
7. *Максимович Н.Г.* Геохимические изменения геологической среды при разработке угольных месторождений / Н.Г. Максимович, К.А. Горбунова // Изв. вузов. Геология и разведка. 1991. №5. С. 137 – 140.
8. *Красавин А.П.* Экологическая реабилитация углепромышленных территорий Кизеловского угольного бассейна в связи с закрытием шахт / А.П. Красавин, Р.Т. Сафин. Пермь: ИПК «Звезда», 2005. 287с.
9. *Баньковская В. М.* Влияние породных отвалов на загрязненность подземных вод / В.М. Баньковская, Т.М. Сухоплюева // Повышение эффективности природоохранных работ в угольной промышленности. Пермь, 1987.
10. *Сафин Р.Т.* Экологические проблемы реструктуризации Кизеловского угольного бассейна / Р.Т. Сафин // Экологические проблемы и здоровье населения Верхнекамья: матер. науч.-практ. конф. Пермь, 2002. С. 42 – 52.
11. *Айруни А.А.* Охрана окружающей среды при подземной добыче угля: Обзор ЦНИЭИуголь / А.А. Айруни. М., 1979. 48 с.
12. *Миронов К.В.* Справочник геолога-угольщика / К.В. Миронов. М.: Недра, 1982. 256 с.
13. *Патент* на полезную модель 50218 Российская Федерация, МПК⁷ С 02 F 1/66. Установка для нейтрализации кислых шахтных вод / Максимович Н.Г., Басов В.Н., Холостов С.Б.; заявитель и патентообладатель ФГНУ «Естественнонаучный институт». № 2005106661; Заявл. 14.03.05; Оpubл. 27.12.05, Бюл. № 36 (Пч.). Изобретения. Полезные модели. 350 с.: ил.
14. *Холостова О.С.* Оценка возможности применения способа очистки кислых шахтных вод отходами содового производства для изливов различных шахтных полей на территории Кизеловского угольного бассейна / О.С. Холостова, Н.Г. Максимович // Эколого-экономические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов: тез. докл. междунар. науч. конф./ ФГНУ «ЕНИ» и др. Пермь, 2005 С. 102 – 103.
15. *Красавин А.П.* Защита окружающей среды в угольной промышленности /А.П. Красавин. М.: Недра, 1991. 221 с.
16. *Максимович Н.Г.* Использование геохимических барьеров для решения проблем угольной промышленности /Н.Г. Максимович // Экологическая реабилитация

промышленных производств и территорий: юбил. сб. ст. Пермь: ОАО «ИПК «Звезда», 2005.
С. 267 – 281.