



УДК 550. 4:502. 5

Фильтрационные утечки из золошлакоотвала и их взаимодействие с геологической средой

С. Х. Павлов (spavlov@crust.irk.ru)
А. И. Оргильянов (irig@crust.irk.ru)
П. С. Бадминов (irig@crust.irk.ru)
И. Г. Крюкова (irig@crust.irk.ru)

Аннотация. На основе комплексного изучения геологической среды района золоотвала определены объемы фильтрационных утечек техногенных вод и впервые установлено и прослежено преобразование их состава в направлении приближения к геохимическому фону в результате взаимодействия с органоминеральными образованиями.

Ключевые слова: техногенные воды, фильтрационные утечки, химический состав поверхностных и подземных вод, трансформация химического состава.

Введение

Прогресс в развитии общества определяется величиной энергетического потенциала, которым оно обладает. В нашей стране, а в условиях Сибири особенно, значение этого фактора жизнеобеспечения многократно возрастает. Получение тепла и электроэнергии связано главным образом с работой тепловых электрических станций. В технологической цепи высокотехнологичных тепловых электрических станций выделяется ряд звеньев, оказывающих негативное влияние на окружающую среду. Таковыми являются технологические процессы, связанные со сжиганием твердых топлив и накоплением и хранением их отходов. Проблема захоронения и утилизации золошлаковых отходов теплоэнергетики по своей масштабности выделяется в ряду многочисленных проблем техногенеза [10]. Кроме изъятия больших площадей земель, особенно ценных в условиях урбанизированных территорий, золоотвалы являются источником загрязнения окружающей среды. Деятельностью ветра обусловлен процесс пыления золоотвалов и загрязнение воздуха на значительном удалении от источника загрязнения. Различные компоненты, в том числе содержание которых строго лимитировано, могут поступить, и поступают, в почвы, грунты, поверхностные и подземные воды.

Анализ видов и интенсивности воздействия золошлакоотвалов на окружающую среду выявил, что из всех объектов природной среды наибольшему загрязнению, в основном химическому, подвергается гидросфера [6; 7; 11]. Влияние тепловых электростанций на водные объекты осуществляется

по двум направлениям: использование водных ресурсов и прямое воздействие на качественное состояние водных объектов путем сброса в них сточных вод с повышенными по сравнению с природной водой концентрациями загрязняющих веществ.

В этой области проводится значительная работа по совершенствованию технологического цикла системы гидрозолоудаления в сторону его приближения к замкнутому оборотному водоснабжению. Такой подход обеспечивает уменьшение прямых сбросов сточных вод, но он не предотвращает их проникновение в водоносные горизонты в результате утечек из прудов-отстойников золоотвалов.

Вопросам минимизации загрязнения природных вод в результате фильтрационных утечек техногенных вод из золошлакоотвалов уделяется достаточно большое внимание. На стадии изысканий мест складирования токсичных отходов обосновывается необходимость проведения литолого-фациального анализа территории с целью оценки защитных свойств пород для предотвращения попадания загрязнителей в подземные воды [8]. В процессе строительства основания и ограждающие дамбы подобных сооружений оборудуются противofильтрационными экранами из природных грунтов и искусственных материалов [2]. Тем не менее проведение даже таких дорогостоящих мероприятий не гарантирует исключения фильтрационных утечек, и острота проблемы не уменьшается. Поэтому постоянно увеличивается число научных исследований по оценке воздействия золошлакоотвалов на окружающую среду, в которых существенная роль отводится загрязнению подземных вод в результате фильтрационных утечек сточных вод из прудов-отстойников золоотвалов.

Однако в значительной степени прослеживается ограниченность подхода к этой проблеме, которая заключается в следующем. Исследуются главным образом геохимические преобразования почв и грунтов золошлакоотвалов и прилегающей территории. Изучение водной компоненты, как правило, ограничивается разовым определением состава пульпы или осветленной воды и техногенных подземных вод, вскрываемых наблюдательными скважинами в ограждающих дамбах золоотвала. Значительно реже распространение техногенных подземных вод прослеживается на прилегающей территории. Комплексный подход к рассмотрению этой проблемы на примере золоотвала ТЭЦ-9 в г. Ангарске применен в данной работе.

Характеристика объекта

Золоотвал равнинного типа площадью более 5 км² расположен на расстоянии 4,8 км от ТЭЦ-9, на левом берегу р. Ангары, в 2,5 км от ее русла. С восточной, северной и южной сторон золоотвал обрамляется болотным массивом. На удалении от 800 до 1500 м с северной и восточной сторон от золоотвала находится крупное линейное гидротехническое сооружение – Большой канал – шириной 46,5 м и глубиной 6 м, протяженность которого приближается к 10 км.

Золошлаки поступают на золоотвал по пульпопроводу системы гидро-золоудаления, где происходит разделение пульпы на водную и твердую фазы. Уровень техногенных вод в пруде-отстойнике подвержен сезонным и внутрисезонным колебаниям, связанным с технологическими процессами работы станции и метеогенными факторами. Большая площадь золоотвала и пруда-отстойника определяет высокую степень зарегулированности уровня воды в пруде-отстойнике. Максимальная величина амплитуды колебания уровня воды в пруде-отстойнике не превышает 30 см.

В геологическом строении основания золоотвала принимают участие песчаники и углистые алевролиты среднеюрского возраста, перекрытые четвертичными аллювиальными песчано-гравийно-галечниковыми образованиями мощностью до 8 м и песками, супесями и суглинками слоем до 5 м, на которых залегают современные отложения торфа. В районе золоотвала распространены водоносные горизонты торфяных образований с водами порового типа, аллювиальных отложений с водами порово-пластового типа и среднеюрский водоносный комплекс с водами трещинно-пластового типа.

По периметру золоотвала в теле ограждающей дамбы заложено 16 створов, на которых по 39 скважинам ведутся наблюдения за водоносным горизонтом в теле плотины и по 43 скважинам – в аллювиальном водоносном горизонте (рис. 1). На удалении от первых десятков до 650 м от золоотвала наблюдения за водами аллювиального водоносного горизонта проводятся еще по 6 скважинам и по одной скважине в непосредственной близости от золоотвала изучаются воды юрского водоносного комплекса.

В основании ограждающей дамбы почти по всему периметру золоотвала проходит дренажная канава, в которую поступают сточные воды в результате сброса из пруда-отстойника и дренирования техногенного водоносного горизонта, сформировавшегося в результате фильтрационных утечек.

Методика исследований

Для выяснения эколого-гидрогеологической ситуации на золоотвале и прилегающей к нему территории был выполнен комплекс полевых и лабораторных исследований. Он предусматривал определение структуры потоков в водном балансе золоотвала и выяснение характера строения геохимического, геофильтрационного, гидрогеодинамического и гидрогеохимического полей. Проведенные исследования включали: гидрометрические замеры расходов потоков, составляющих водный баланс золоотвала; опытно-фильтрационные работы в наблюдательных скважинах; отбор проб золошлаков, почв, грунтов, пород, воды; полевые химико-аналитические определения; лабораторные химико-аналитические исследования; режимные наблюдения. Работы проводились в соответствии с наставлениями, методическими рекомендациями, инструкциями и нормативными документами по соответствующим видам работ. Анализы выполнены в сертифицированных лабораториях.

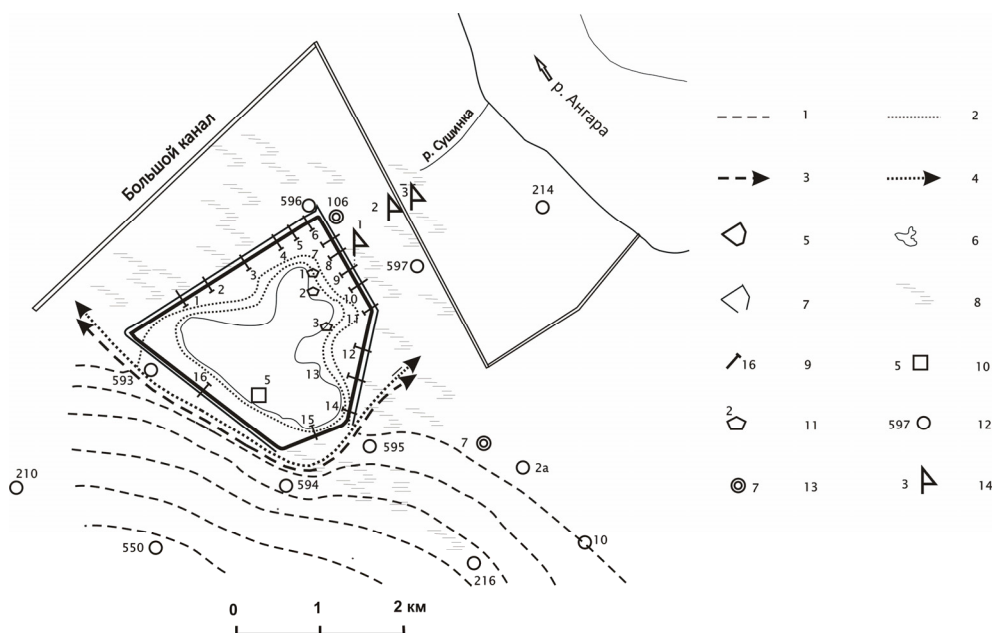


Рис. 1. Схема строения гидродинамического поля района золоотвала в современных условиях.

1 – гидроизогипса естественного потока подземных вод; 2 – гидроизогипса техногенного потока подземных вод; 3 – линия тока естественного потока подземных вод; 4 – линия тока техногенного потока подземных вод; 5 – дамба золоотвала; 6 – пруд осветленной воды; 7 – дренажная канава; 8 – болото; 9 – створ наблюдательных скважин и его номер; 10 – шахтный колодец № 5; 11 – место выпуска пульпы и его номер; 12 – скважина и ее номер; 13 – группа скважин и ее номер; 14 – место опробования и номер пробы болотных вод

Полученные результаты и их обсуждение

Водный баланс золоотвала. Для выяснения структуры потоков, формирующихся на золоотвале и в зоне его влияния, был исследован его водный баланс. Основными величинами, составляющими приходную часть баланса золоотвала, являются золошлаки и вода, необходимая для их транспортировки, и атмосферные осадки. Выяснилось, что в годовом периоде отношение между максимальным и минимальным количеством выхода золошлаков изменяется в 5 раз, тогда как отношение между максимальным и минимальным объемами воды, потребовавшимися на их транспортировку, не превышает 1,8. То есть в течение года величина отношения между твердой и жидкой частями пульпы отличается большой неравномерностью. Она изменяется в очень широких пределах от 26 до 102. Наибольшие значения отвечают теплому периоду года.

Более стабильными во времени являются элементы расходной части водного баланса золоотвала, связанные с технологическим процессом опосредованно. К таким статьям водного баланса относятся прежде всего фильтрационные утечки. Достаточно детально они были исследованы с помощью гидрометрических измерений в дренажной канаве. Установлена зна-

чительная неравномерность поступления фильтрационных утечек на различных участках дренажной канавы, связанная с фильтрационными свойствами пород и дренирующими особенностями (изменение величины дополнительного фильтрационного сопротивления ΔL) гидротехнического сооружения. Однако общий объем разгрузки фильтрационных утечек в дренажную канаву достаточно стабилен и составляет $10\ 800\ \text{м}^3/\text{сут}$.

Результаты опытно-фильтрационных работ. Основной целью проведения опытно-фильтрационных работ являлось получение фильтрационных параметров водоносного горизонта на площади размещения золоотвала. Результаты гидродинамического опробования наблюдательных пьезометров и скважин на прилегающей территории позволили получить данные о фильтрационных свойствах аллювиального водоносного горизонта и значительно расширить представления о характере их изменения по площади и повысить достоверность расчетных гидрогеологических параметров.

Установлено, что в целом, исключая единичные экстремальные значения, величина коэффициента фильтрации колеблется вокруг его среднего значения $9,3\ \text{м}/\text{сут}$ и изменяется от $3,8$ до $14,4\ \text{м}/\text{сут}$. Анализ гидрогеологических условий рассматриваемой территории, основанный на результатах региональных, поисково-разведочных и геоэкологических работ, показывает, что эти значения являются реальными для аллювиального водоносного горизонта третьей надпойменной террасы р. Ангары, на удалении первых километров от ее русла или русел ее притоков.

Достаточно низкими фильтрационными свойствами на рассматриваемой площади обладает водоносный комплекс верхней подсвиты присаянской свиты средней юры. Величина коэффициента фильтрации на различных участках его распространения изменяется незначительно – от $0,64$ до $1,2\ \text{м}/\text{сут}$ и в среднем равна $0,88\ \text{м}/\text{сут}$.

Результаты режимных наблюдений и строение гидрогеодинамического поля района золоотвала. Режимные наблюдения за уровнем подземных вод выявили, что уровень техногенных подземных вод имеет двойную природу. В теле плотины распространены техногенные воды со свободной поверхностью, в аллювиальном водоносном горизонте они имеют напорный характер. Превышение уровня безнапорных вод над уровнем напорных вод достигает $3\text{--}4\ \text{м}$ и свидетельствует о возможности нисходящей фильтрации из тела плотины в аллювиальный водоносный горизонт. Результаты режимных наблюдений за уровнем воды в наблюдательных скважинах показали, что во временном разрезе и безнапорные, и напорные воды подвержены сезонным колебаниям, характер и амплитуда которых определяются метеогенными факторами и фильтрационными свойствами водовмещающих грунтов и пород. В теле плотины амплитуда колебания уровня подземных вод превышает $3\ \text{м}$. В аллювиальном водоносном горизонте она не достигает $1,5\ \text{м}$.

По мере движения фильтрационного потока от пруда-отстойника к ограждающей дамбе и за ее пределы разность уровня напорных и безнапорных вод уменьшается, и в районе дренажной канавы уровень воды аллюви-

ального водоносного горизонта уже превышает уровень безнапорного потока. В дренажную канаву разгружаются как безнапорные, так и напорные техногенные воды. Если безнапорный поток техногенных вод полностью перехватывается дренажной канавой, то поток аллювиального водоносного горизонта разделяется: часть его дренируется канавой, а часть продолжает движение за пределы площади золоотвала. Эта составляющая потока техногенных вод является наиболее важной как источник загрязнения подземных и поверхностных вод окружающей территории.

Для линейного потока грунтовых вод, проходящего через площадь золоотвала в естественных условиях, его сооружение сыграло роль барража. Из пруда-отстойника осветленная вода растекается радиальным потоком во всех направлениях (см. рис. 1). И если в северо-западном и северо-восточном направлениях поток техногенных вод свободно движется к основной дрене – Большому каналу, то, двигаясь в юго-западном и юго-восточном направлениях, он встречается с естественным потоком подземных вод. Место встречи естественного и техногенного потоков в грунтовом водоносном горизонте прослеживается по разнонаправленным линиям токов, проходящим по минимальным отметкам депрессионной поверхности (фильтрационной ложбине) на расстоянии от нескольких десятков до 100–120 м от внешнего контура ограждающей дамбы золоотвала. Гидродинамическая схема, приведенная на рис. 1, позволяет сделать важный вывод о том, что в пределах площади, ограниченной участками Большого канала и разнонаправленными линиями токов, в аллювиальном водоносном горизонте полностью распространены осветленные воды из пруда-отстойника золоотвала.

Анализ соотношения уровня воды в аллювиальном водоносном горизонте и в водоносном комплексе верхней подсвиты присаянской свиты юры свидетельствует о нисходящем движении грунтовых вод в юрский водоносный комплекс. Такое соотношение положения поверхности уровня аллювиального водоносного горизонта и пьезометрической поверхности водоносного комплекса верхней подсвиты присаянской свиты юры устанавливается не только на площади золоотвала, но, как показывают результаты региональных поисково-разведочных и геоэкологических исследований, имеет широкое развитие. Прослеживание их поведения во времени в естественных и нарушенных условиях в результате как кратковременного, так и продолжительного водоотбора свидетельствует о наличии постоянного нисходящего движения грунтовых вод и о достаточно тесной их взаимосвязи с подземными водами юрского водоносного комплекса. Таким образом, нисходящее движение осветленных вод из пруда золоотвала происходит не только в аллювиальный водоносный горизонт, но и в водоносный комплекс верхней подсвиты присаянской свиты средней юры.

Объемы фильтрационных утечек из золоотвала. Рассмотренные выше элементы водного баланса золоотвала, фильтрационные свойства пород и особенности строения гидрогеодинамического поля золоотвала и прилегающей к нему территории свидетельствуют о постоянном оттоке осветленной воды через дно пруда-отстойника. Специально разработанные ана-

литические методы расчета фильтрационных утечек воды из таких гидротехнических сооружений, как хвостохранилища и гидроотвалы, характеризующихся наиболее сложным геофильтрационным режимом [4], в данной ситуации не могут быть применены. Это обусловлено отсутствием необходимых для этого расчетных параметров, объективно характеризующих нисходящее движение фильтрационного потока на огромной территории – площадью более 5 км². Имеющийся фактический материал позволяет оценить расход потока техногенных вод в аллювиальном водоносном горизонте и в верхнеприсаянском водоносном комплексе средней юры гидродинамическим методом.

Объем полученных фильтрационных параметров образует достаточно представительный ряд, характер распределения которого показывает, что исследуемый водоносный горизонт обладает типичными фильтрационными свойствами, характерными для аллювиальных гравийно-галечниковых отложений. Среднее значение величины коэффициента фильтрации адекватно отражает фильтрационные способности как аллювиального водоносного горизонта, так и юрского водоносного комплекса. Мощность аллювиального водоносного горизонта изменяется в широких пределах от 0,5 до 14,1 м. Средняя ее величина равна 4,95 м. Поскольку это значение получено из достаточно представительной выборки (108), то оно объективно отражает мощность водоносного горизонта на исследуемой площади.

Уклоны потока техногенных подземных вод в аллювиальном водоносном горизонте по периметру золоотвала прослежены по 16 створам наблюдательной сети пьезометров (см. рис. 1). Величина уклонов в зависимости от фильтрационных свойств пород и условий взаимодействия техногенного и естественного фильтрационных потоков изменяется в широких пределах – от 0,00038 до 0,20667. Средние их значения при крайних положениях отметок уровня подземных вод равны: при высоком уровне (октябрь) – 0,04174; при низком уровне (март) – 0,02762.

Между внешней границей золоотвала, проходящей по дренажной канаве, и Большим каналом уклон потока техногенных вод значительно меньше и изменяется от 0,0012 до 0,00902. Среднее его значение равно 0,00336. Эта величина изменяется крайне незначительно во времени и близка к постоянной. Высокая зарегулированность гидрогеодинамического поля на этой площади обусловлена незначительной по величине (0,20–0,25 м) амплитудой колебания уровня воды в Большом канале.

Линейные размеры фильтрационного потока техногенных вод в аллювиальном водоносном горизонте определяются длиной ограждающей дамбы и приняты равными 8800 м. Длина контура дренирования Большого канала ограничивается линиями тока, проходящими по границе встречи естественного и техногенного потоков подземных вод. Она равна 8375 м.

Расчет расхода потока подземных вод, формирующегося за счет фильтрационных утечек осветленной воды из пруда-отстойника, проведен по формуле Дарси [9]:

$$Q = k \times F \times J,$$

где Q – расход подземного потока, м³/сут; k – коэффициент фильтрации, м/сут; J – градиент напора; F – площадь поперечного сечения потока, м².

Расчет расхода потока подземных вод в аллювиальном водоносном горизонте по периметру золоотвала выполнен для периодов максимального (осеннего) и минимального (зимнего) положений уровня подземных вод: $Q_{\max} = 15\,946$ м³/сут; $Q_{\min} = 10\,550$ м³/сут. Расход потока техногенных вод в аллювиальном водоносном горизонте на участке дренажная канава – Большой канал равен $Q = 1221$ м³/сут.

Анализ рассчитанных расходов потоков подземных техногенных вод показывает следующее. Разность между объемами воды, профильтровавшимися из золоотвала и поступившими в Большой канал, является суммарным расходом осветленной воды в дренажной канаве, поступающим туда в результате фильтрационных утечек. Данные измерений расходов воды в дренажной канаве в период минимального положения уровня подземных вод показывают, что объем фильтрационных утечек, поступающих в дренажную канаву, составил 10 800 м³/сут. Разница между рассчитанным и измеренным расходами потоков фильтрационных утечек, поступающих в дренажную канаву, составляет всего 250 м³/сут. Независимый характер определения различными методами одних и тех же элементов водного баланса золоотвала с высокой сходимостью результатов свидетельствует об их достоверности и соответствии реальным условиям.

Как показали проведенные расчеты, объем фильтрационных утечек, минующих дренажную канаву идвигающихся к Большому каналу, длина контура дренирования которого равна 8375 м, незначителен по величине. Однако в данном случае важно установить, какое влияние этот поток оказывает на качество подземных и поверхностных вод прилегающей территории.

Гидрогеохимическая ситуация в районе золоотвала. Данные по макро-, микрокомпонентному и газовому составу подземных и поверхностных вод, собранные в процессе выполнения настоящей работы, позволили достаточно обоснованно оценить гидрогеохимическую ситуацию в районе золоотвала. Установлены границы распространения природных и техногенных поверхностных и подземных вод исследованного района с различной минерализацией и своеобразным компонентным составом. Прослежены направленность и характер изменения различных гидрохимических характеристик фильтрационных утечек, которые подчиняются четко выраженной закономерности, проявляющейся по направлению движения потока техногенных вод.

На площади золоотвала и прилегающей к нему территории до начала техногенных преобразований подземные воды в рыхлых отложениях четвертичного возраста, распространяющиеся от Ангаро-Китойского водораздела к р. Ангаре, имели состав, типичный для вод, развитых в песчано-гравийных отложениях на начальном этапе инфильтрационного цикла формирования состава подземных вод зоны интенсивного водообмена (табл. 1). Минерализация их около 0,5 г/л, среди анионов доминируют гидрокарбонатные ионы, а среди катионов ионы кальция и магния. Вне зоны влияния

золоотвала или других технических или урбанизированных систем эта обстановка в целом сохранилась и в настоящее время. Как видно из табл. 1, минерализация воды на отдельных участках не превышает 0,3 г/л и сохраняется гидрогеохимическая ситуация, близкая к обстановке, существовавшей в естественных условиях. Вместе с тем ярко проявляются и заметные отличия. Это хорошо видно по увеличению концентрации сульфатных ионов. Однако повышение содержания сульфатных, а также хлоридных ионов возможно и в отсутствие золоотвалов. Гидрогеохимические данные региональных исследований левобережья р. Ангары свидетельствуют, что подобные изменения бывают связаны с влиянием на подземные воды других объектов на промышленных, агропромышленных или урбанизированных территориях.

Таблица 1

Основные гидрохимические показатели подземных вод аллювиального водоносного горизонта района золоотвала в естественном состоянии и в современных условиях

Водопункт (рис. 1)		мг/дм ³							
		Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₄ SiO ₄	Минерализация	O ₂
Ненарушенные условия	210	64	284	9	0,2	0	12	410	–
	214	65	353	6	0,4	6	18	525	–
	216	63	320	0	0,4	2	14	444	–
Современные условия	594	28	165	1	0,4	42	2	291	–
	595	31	250	0	0,4	40	6	388	–
	р. Сушилка, устье	102	375	0	0,3	65	26	654	11,25

При приближении к золоотвалу гидрогеохимическая ситуация существенно изменяется. В зоне его влияния, которая ограничивается, как было показано выше, разнонаправленными линиями токов, формирующимися в месте слияния двух встречных потоков – природного и техногенного, развиты гидрокарбонатно-сульфатные воды. На площади золоотвала состав подземных техногенных вод соответствует составу осветленной воды. Поток техногенных вод, растекающийся из пруда-отстойника золоотвала, претерпевает ряд значительных трансформаций и имеет различный состав на разных участках движения от места инфильтрации из пруда-отстойника к местам разгрузки. Процесс его формирования представляет значительный научный и практический интерес. Поэтому важно проследить его начиная с момента поступления пульпы в пруд-отстойник.

В таблице 2 приведены основные гидрохимические характеристики пульпы в трех местах ее одновременного выпуска из системы гидрозолоудаления в пруд-отстойник золоотвала (см. рис. 1) в начале и конце зимнего периода. Минерализация этого сульфатного кальциевого раствора изменяется почти в два раза от 0,55 до 1,03 г/л. Значителен также интервал изменения основной интегральной гидрохимической характеристики раствора, величины рН (8,1–11,25), определяющей формы нахождения соединений различных элементов, присутствующих в растворе, и их миграционные воз-

возможности. Природа таких больших колебаний основных комплексных гидрoхимических характеристик золошлакового раствора в данном случае, как это было показано выше, обусловлена технологическим режимом работы ТЭЦ, а именно большим изменением величины отношения количества смывной воды к количеству перемещаемых золошлаков, которая, при прочих равных условиях, определяет степень взаимодействия воды с золошлаками.

Таблица 2

Основные гидрохимические характеристики пульпы в местах ее сброса из системы гидрозолоудаления в пруд-отстойник

Место выпуска (рис. 1)	рН	мг/дм ³						
		Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₄ SiO ₄	Минерализация
3 (осень)	11,4	299	0	102	23	558	20	1026
1 (весна)	8,1	251	57	0	16	592	38	992
2 (весна)	8,3	127	70	2	20	261	40	546
3 (весна)	9,7	245	4	36	15	533	26	896

В пруде-отстойнике происходит освобождение раствора от взвешенных частиц, и протекают физико-химические процессы, стремящиеся привести раствор к состоянию равновесия, которые в целом можно определить как процессы «старения» раствора. Осветленная вода на выходе из пруда-отстойника поверхностным путем, через шахтный колодец № 5 в дренажную канаву, в отличие от пульпы, обладает достаточно устойчивыми физическими свойствами и гидрохимическими характеристиками (табл. 3). Это в определенной степени связано с перемешиванием пульпы различного состава при ее движении от мест выпуска к пруду-отстойнику и отсутствием в этот период разбавляющего эффекта атмосферными осадками. Формирование ледяного покрова в пруде-отстойнике прекращает связь осветленной воды с атмосферой, и это стабилизирует ее кислотно-основное состояние и понижает содержание растворенного кислорода с 12 до 8 мг/л. Практически стабильными являются величина минерализации и концентрация основных макрокомпонентов раствора.

Таблица 3

Основные гидрохимические характеристики осветленной воды в пруде-отстойнике золоотвала в шахтном колодце № 5

Время отбора	t °С	рН	мг/дм ³							
			Ca ²⁺	HC O ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₄ SiO ₄	Минерализация	O ₂
Осень	1,8	9,3	190	46	12	9	421	19	732	12,8
Весна	2,0	9,4	189	11	37	21	412	25	727	8,0

Осветленная вода, которая в результате утечек формирует фильтрационный поток техногенных вод, вступает в сложные физико-химические взаимодействия с золошлаковыми отложениями, слагающими борта и дно пруда-отстойника, и с водовмещающими породами безнапорного и напорного водоносных горизонтов. Фильтрационный поток осветленной воды

сульфатного кальциевого состава из пруда-отстойника распространяется по всей площади золоотвала и за его пределы. Результаты гидрогеохимического опробования наблюдательных скважин по периметру золоотвала и за его пределами показывают, что уже на границе развития золошлаковых отложений техногенные воды претерпевают существенную метаморфизацию состава (табл. 4).

Таблица 4

Основные гидрохимические показатели техногенных подземных вод, развитых по периметру золоотвала

№ створа/ № скважины (рис. 1)	$t_{\text{H}_2\text{O}}^0$ С	рН	мг/дм ³						
			Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₄ SiO ₄	Минерализация
1/1	6,6	7,7	170	185	0	3,0	388	50	819
6/17	6,4	6,8	201	32	0	4,0	531	20	826
10/30	6,8	7,5	165	114	0	3,0	376	33	727
16/43	6,8	8,2	150	158	1,2	0,3	328	20	709

На различных направлениях движения фильтрационного потока техногенных вод процесс преобразования исходного состава осветленной воды протекает по-разному. Это обусловлено тем, что природные и техногенные водовмещающие отложения отличаются высокой неоднородностью распространения по площади и по разрезу и изменением их фильтрационных свойств. Однако, несмотря на это, в преобразовании техногенных вод прослеживаются хорошо выраженные общие черты. Независимо от степени метаморфизации исходного состава техногенных вод, их взаимодействие с золошлаками, почвами и породами приводит к существенному (до 2 ед. рН) понижению кислотно-основных свойств. Значительно уменьшается содержание ионов кальция, карбонатных, фтора и сульфатных. Если концентрация кальция и сульфатов понижается на 30–40 %, то содержание карбонатов и фтора достигает окружающего гидрогеохимического фона.

Весомое уменьшение содержания рассмотренных компонентов не приводит к ощутимому понижению минерализации техногенных вод. Это обусловлено противоположным процессом увеличения содержания гидрокарбонатных ионов и магния. Концентрация магния увеличивается более чем в 3 раза, а гидрокарбонатных ионов – в 5–6 раз. Таким образом, в процессе движения фильтрационного потока техногенных вод, взаимодействующих с органоминеральными образованиями, происходит хорошо выраженное устойчивое преобразование состава осветленной воды в сторону соответствия гидрогеохимическому фону. Этот процесс активно продолжается за пределами золоотвала.

Внешней границей распространения подземных техногенных вод сульфатного кальциевого состава является дренажная канава. На этой границе разгружается основная часть фильтрационного потока техногенных вод. Здесь происходит не только значительное перераспределение его объемов между подземной и поверхностной составляющими, как это было показано выше, но и продолжается активное переформирование химического

состава. При незначительном понижении величины общей минерализации воды идет достаточно интенсивное уменьшение содержания сульфатных и рост гидрокарбонатных ионов, которые переходят в ведущие компоненты химического состава. В катионной части это сопровождается уменьшением содержания кальция. Процесс преобразования состава техногенных подземных вод, сформированных в результате фильтрационных утечек осветленной воды, в основном реализуется на расстоянии 400–500 м. Метаморфизация химического состава техногенных подземных вод хорошо прослеживается по скважинам (см. табл. 1) и показывает, что на удалении от золоотвала подземные воды становятся гидрокарбонатными магниево-кальциевыми и отличаются от их состава в естественных условиях только более высоким содержанием кальция и сульфатных ионов.

Различные стадии изменения состава техногенных подземных вод хорошо прослеживаются не только по скважинам. Не менее ярко этот процесс проявляется по результатам разгрузки фильтрационного потока техногенных вод в чаши водоемов болотного массива, окружающего золоотвал (табл. 5).

Таблица 5

Основные гидрохимические показатели болотных вод

Место отбора пробы (рис. 1)	pH	мг/дм ³							
		Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₄ SiO ₄	Минерализация	O ₂ /CO ₂
1	7,6	152	281	0	3,0	264	10	763	10,8/44,9
2	7,3	92	307	0	2,0	65	2	496	9,3/26,4
3	7,1	20	65	0	0,5	12	6	124	8,0/33,4

Водные чаши болотных водоемов можно назвать таковыми в настоящее время лишь условно, поскольку они расположены в пределах болотного ландшафта и на них развита болотная растительность. В действительности это огромные по объему техногенные водоемы, которые образовались в результате выемки песчано-гравийной смеси. У них довольно правильная форма и ровное песчано-гравийное дно. Наибольший из этих водоемов имеет размеры 190–420 м и глубину от 1,4 до 1,6 м. Эти водоемы играют существенную регулирующую роль в водном балансе золоотвала. Они являются крупными дренами по отношению к фильтрационному потоку техногенных вод в аллювиальном водоносном горизонте, и поэтому основная его часть аккумулируется в этих водоемах и не доходит до Большого канала. В болотных водах с понижением кислотно-щелочного равновесия и уменьшением сульфатных ионов часть серы переходит в восстановленную форму в виде гидросульфидного иона, содержание которого достигает 2,2 мг/л.

В изменении химического состава болотных вод с удалением от золоотвала, результаты физико-химических взаимодействий осветленной воды с техногенными и природными водовмещающими отложениями значительно увеличиваются (см. табл. 1 и 5). Процесс преобразования состава техногенных подземных вод, а также участие в формировании болотных вод наряду с подземными водами атмосферных осадков приводит к тому, что состав болотных вод на удалении от золоотвала становится близок к их составу в естественных условиях.

Результаты этого процесса прослеживаются и по данным гидрохимического опробования Большого канала, которое выявило следующие закономерности (табл. 6). В дно канала в средней, наиболее глубокой, его части происходит разгрузка подземных вод гидрокарбонатного магниево-кальциевого состава. Это отчетливо прослеживается как по величине минерализации воды, так и по концентрации растворенных газов – кислорода и углекислоты. Однако поступающие в дно канала воды не являются результатом разгрузки фильтрационного потока техногенных вод, двигающегося от золоотвала по направлению к Большому каналу. Геохимический облик подземных вод, разгружающихся в глубокой части дна канала, позволяет отчетливо идентифицировать их с водами водоносного комплекса средней юры. Одним из главных критериев такого вывода является отсутствие в них сульфатных ионов.

Таблица 6

Основные гидрохимические показатели воды в Большом канале

Расстояние от левого берега, глубина отбора	pH	мг/дм ³							O ₂ /CO ₂
		Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₄ SiO ₄	Минерализация	
3 м, подо льдом	7,6	22	88	0	0,3	4	5	125	11,4/9,7
3 м, у дна – 1,15 м	7,6	21	88	0	0,3	4	4	124	10,6/7,9
21 м, подо льдом	7,6	21	85	0	0,3	4	5	121	11,4/14,1
21 м, у дна – 6,0 м	7,1	38	164	0	0,5	0	14	237	3,7/31,7
42 м, подо льдом	7,6	21	85	0	0,3	4	7	129	12,1/8,8
42 м, у дна – 1,85 м	7,5	20	83	0	0,4	4	7	118	10,9/9,7

Техногенные воды после ряда изменений, приводящих к переходу их из сульфатного в гидрокарбонатный тип, содержат в своем составе сульфаты в количестве около 40 мг/л. Полное отсутствие сульфатов в составе подземных вод, разгружающихся в дно канала, свидетельствует о разгрузке подземных вод именно среднеюрского водоносного комплекса. Пониженная минерализация и отсутствие сульфатов в этих водах достаточно подробно прослежены ранее при проведении региональных комплексных геологических, инженерно-геологических и гидрогеологических работ. Таким образом, Большой канал является крупной дреной не только для подземных вод аллювиального водоносного горизонта, но и для среднеюрского водоносного комплекса.

Большой канал выполняет сложную роль по отношению к аллювиальному водоносному горизонту и среднеюрскому водоносному комплексу. Являясь для них крупной дреной, он в то же время служит контуром питания для подземных вод, развитых в массиве пород, расположенным между Большим каналом и р. Ангарой. Вода в Большом канале в основной своей массе по химическому составу и величине минерализации соответствует

составу воды в р. Ангаре (см. табл. 6). Эти низкоминерализованные поверхностные воды определяют геохимический облик подземных вод в фильтрационном потоке, двигающемся от Большого канала в сторону р. Ангары.

Трансформация химического состава потоков техногенных вод, формирующихся в результате фильтрационных утечек, в направлении приближения их к природному гидрогеохимическому фону выявлена в зоне влияния других золоотвалов [12] и мест складирования отходов химических производств [1]. Эти процессы протекают естественным путем без создания искусственных геохимических барьеров на пути движения техногенных вод [3]. В процессе взаимодействия техногенных вод с минеральными и органоминеральными образованиями формируются окислительно-восстановительный, кислотнo-щелочной, сероводородный и различные минеральные геохимические барьеры для компонентов водных растворов [5], которые являются основными по отношению к ландшафтно-геохимическим барьерам. Результаты исследования физико-химических процессов взаимодействия в рассматриваемых системах [5] исчерпывающе объясняют трансформацию химического состава осветленной воды при ее фильтрации через золошлаки, песчано-гравийные отложения, песчаники и почвы. Сорбционные свойства грунтов основания золоотвала, с которыми обычно связывается минимизация химического загрязнения подземных вод в результате фильтрационных утечек техногенных вод [8], как следует из проведенного выше анализа, не являются определяющими и/или системообразующими факторами этого процесса. Таким образом, трансформация химического состава осветленной воды от сульфатного к гидрокарбонатному типу со снижением минерализации является закономерным следствием физико-химических процессов ее взаимодействия с минеральными и органоминеральными образованиями в конкретных гидрогеологических условиях.

Выводы

Установленные в результате выполненного исследования параметры фильтрационного поля и гидрогеодинамическая ситуация, сложившаяся в районе золоотвала, позволили оценить расходы фильтрационного потока техногенных вод по периметру золоотвала до дренажной канавы и от дренажной канавы до контура дренирования Большим каналом. Сравнение результатов расчета фильтрационных утечек гидродинамическим методом на участке «золоотвал – дренажная канава» с данными, полученными гидрометрическими замерами, показало их хорошую сходимость, что свидетельствует об их достоверности и соответствии реальным условиям. Сравнение объемов потока техногенных вод на участках «золоотвал – дренажная канава» и «дренажная канава – Большой канал» выявило высокую дренирующую способность дренажного устройства.

Установлено, что поток, формирующийся в процессе фильтрационных утечек техногенных сточных вод, взаимодействуя с водовмещающими отложениями, претерпевает сильную метаморфизацию. Осветленная вода сульфатного кальциевого состава трансформируется в гидрокарбонатные магниево-кальциевые воды. Их состав приближается к составу подземных

вод аллювиального водоносного горизонта, распространенных в ненарушенных условиях.

Фильтрационный поток техногенных высокощелочных сульфатных кальциевых вод превращается в нейтральные гидрокарбонатные воды не в результате смешения, разбавления или под действием сорбционных процессов, хотя они, безусловно, вносят свой определенный вклад, а в результате физико-химических взаимодействий осветленной воды с техногенными и природными минеральными образованиями, выполняющими основание золоотвала. Физико-химическое взаимодействие техногенных сточных вод с минеральными и органоминеральными отложениями естественным путем предельно минимизирует негативное воздействие сточных вод на геологическую среду.

Таким образом, выполненное исследование показало, что в рассматриваемой сложной природно-техногенной системе, благодаря удачному сочетанию ее природных и техногенных элементов, взаимодействие сточных вод ТЭЦ с геологической средой приводит к ограниченному их влиянию на природные воды.

Список литературы

1. Особенности формирования ландшафтно-геохимических барьеров в зоне влияния отходов химических производств (Гомельский химический завод) / А. П. Гусев, О. В. Шершнев, А. И. Павловский, И. О. Прилуцкий, А. Ф. Акулевич // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2013. – № 2. – С. 147–152.
2. Инструкция по проектированию и строительству противοfiltrационных устройств из полиэтиленовой пленки для искусственных водоемов. СН 551–82 / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 40 с.
3. О возможности эффективной защиты подземных вод от поверхностных источников загрязнений посредством сооружения в зоне аэрации восстановительных геохимических барьеров / В. М. Курочкин, Ю. В. Культин, В. Д. Ахунов, А. И. Рыбальченко, М. К. Пименов, Е. В. Захарова, Е. П. Каймин, А. А. Зубков // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2003. – № 1. – С. 55–60.
4. Мироненко В. А. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах / В. А. Мироненко, В. Г. Румынин, В. К. Учаев. – Л.: Недра, 1980. – 320 с.
5. Павлов С. Х. Физико-химические процессы взаимодействия сточных вод ТЭЦ с органоминеральными образованиями: предотвращение ухудшения геологической обстановки. Экологический риск и экологическая безопасность / С. Х. Павлов, К. В. Чудненко // Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2012. – Т. 1. – С. 251–253.
6. Питьева К. Е. Гидрогеохимические аспекты охраны геологической среды / К. Е. Питьева. – М.: Наука, 1984. – 221 с.
7. Рекомендации по контролю за состоянием грунтовых вод в районе размещения золоотвалов ТЭС. – СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2000. – 28 с.
8. Сергеев В. И. Литолого-фациальный анализ при оценке защищенности подземных вод на участке складирования токсичных отходов (на примере Омской ТЭЦ-4) / В. И. Сергеев, Т. Г. Шимко, Н. А. Свиточ // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2008. – № 4. – С. 342–349.

9. Силин-Бекчурин А. И. Динамика подземных вод / А. И. Силин-Бекчурин. – М. : Изд-во МГУ, 1965. – 375с.
10. Таусон Л. В. Современные проблемы геохимии техногенеза / Л. В. Таусон // Геохимия техногенных процессов. – М. : Наука, 1990. – С. 3–13.
11. Тютюнова Ф. И. Гидрогеохимия техногенеза / Ф. И. Тютюнова. – М. : Наука, 1987. – 335 с.
12. Золоотвалы ТЭЦ как потенциальные источники загрязнения окружающей среды / В. С. Хомич, Д. Ю. Городецкий, Е. П. Овчарова, В. С. Рыжиков, С. В. Савченко, Г. М. Бокая, П. В. Курман // Природопользование : сб. науч. тр. – Минск, 2012. – Вып. 21. – С. 124–135.

The Filtration Leakage from ash Dumps and their Interaction with the Geological Environment

S. Kh. Pavlov, A. I. Orgilynov, P. S. Badminov, I. G. Krjukova

Abstract. On the basis of comprehensive study of the geological environment in the ash dump areas, the amounts of filtrational leakage of technogenic waters were determined and the change of their composition due to interaction with organic-mineral rocks were traced.

Keywords: technogenic waters, filtrational leakage, a chemical composition of surface and ground waters, change of a chemical composition.

Павлов Сергей Харитонович
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
тел.: (3952) 42–27–77

Оргильянов Алексей Июльевич
главный специалист
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42–27–77

Бадминов Прокопий Сократович
ведущий инженер
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел. (3952) 42–27–77

Крюкова Ирина Георгиевна
ведущий инженер
Институт земной коры СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42–27–77

Pavlov Sergei Kharitonovich
Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Research Scientist
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontova st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952)42–27–77

Orgilynov Alexei Ijlievich
Main Expert
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontova st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42–27–77

Badminov Prokopii Sokratovich
Leading Engineer
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontova st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42–27–77

Krjukova Irina Georgievna
Leading Engineer
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontova st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42–27–77