

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОСТУПЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИЗ ПРОМЫШЛЕННОГО БАССЕЙНА- ХРАНИЛИЩА В ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ

Е.В. Кононченко

ФГБУ «Гидроспецгеология», г. Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4, lena.konon@mail.ru

Открытые промышленные бассейны-хранилища, содержащие промышленные отходы и стоки, являются потенциальными источниками загрязнения грунтовых вод. Для оценки влияния бассейнов на окружающую среду необходимо ведение мониторинга состояния грунтовых и поверхностных вод в районах их размещения, а также разработка численных моделей миграции загрязнения в грунтовых водах.

При расположении хранилищ на участках со значительной мощностью зоны аэрации (ЗА) и относительно невысокими фильтрационными свойствами её отложений, продвижение фронта загрязнения до уровня грунтовых вод (УГВ) будет замедляться. Оно может происходить длительное время при отсутствии признаков загрязнения по данным мониторинга. В таких случаях становится необходимой разработка моделей его миграции в отложениях ЗА.

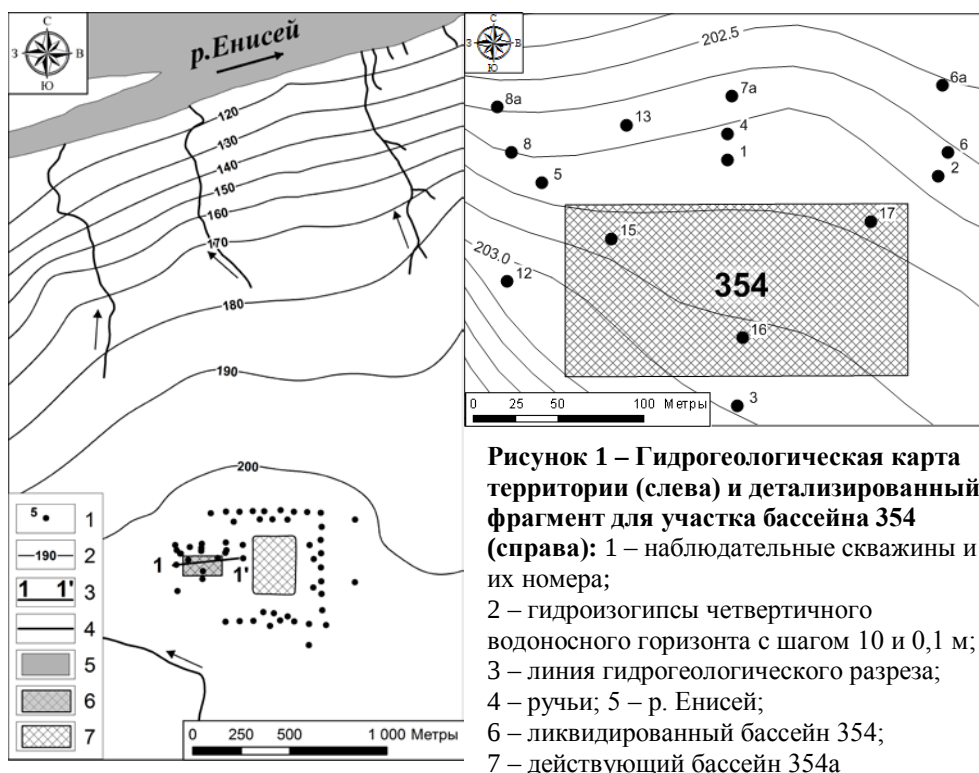
Ликвидация бассейнов-хранилищ обычно проводится путём откачки жидкой фазы и послойной засыпки, в результате чего накопившиеся донные отложения остаются на дне бассейнов и продолжают представлять потенциальную опасность, как источник загрязнения.

Целью данной работы является определение возможных механизмов поступления загрязнения из ликвидированного бассейна-хранилища в грунтовые воды на основе комплексного анализа природно-техногенных условий рассматриваемой территории и разработки численных моделей миграции компонентов в отложениях ЗА.

Геологическое строение и гидрогеологические условия

Ликвидированный бассейн 354 расположен в долине р. Енисей (рис. 1) на 7-й надпойменной террасе. В строении террасы выделяются нижняя, русловая и верхняя, пойменная фации аллювия. Русловая фация представлена преимущественно гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем и песками, а пойменная фация – суглинками с прослоями и линзами супесей и песков (рис. 2).

К нижней части аллювиальных отложений террасы приурочен грунтовый водоносный горизонт, относительным водоупором для которого является толща среднеюрских глинистых отложений.



ЗА в районе размещения бассейна охватывает всю пойменную фацию аллювия, а также часть русловой фации. Мощность отложений ЗА составляет около 35 м, от дна бассейна до УГВ – около 27 м.

Характеристика бассейна 354 как источника загрязнения и анализ результатов гидрогеологического мониторинга

Бассейн 354 был предназначен для приёма и временного хранения промышленных отходов и стоков. Он сооружен на естественном грунтовом основании. Дно и откосы бассейна оборудованы противофильтрационным экраном (ПФЭ) (слои 1-3 на рис. 2), который представлен: уплотнёнными суглинками (0,8 м), глинами (0,5 м) и песчано-гравийной смесью (0,15 м).

Эксплуатация бассейна осуществлялась с 1958 по 1978 гг. и была прекращена в связи с накоплением большого количества донных отложений. В период с 1978 по 1990 гг. отходы в бассейн не поступали.

В 1990-1991 гг. выполнены работы первого этапа ликвидации бассейна 354, заключающиеся в первичной засыпке местными грунтами, представленными супесью и суглинком. В ходе первичной засыпки бассейна наиболее текучая часть донных отложений (гидроокисная пульпа) пропитывала грунты засыпки и выдавливалась на поверхность. На рисунке 2, где слой первичной засыпки обозначен цифрой 5, видно, что он находится на несколько метров выше бортов ПФЭ. В 2008 г. бассейн 354 был окончательно ликвидирован путем послойной отсыпки (слои 6-8 на рис. 2).

В контуре ранее существовавшей чаши бассейна 354 после его ликвидации пробурено три скважины, которые показали наличие верховодки,

Бассейн 354

а.о., м

В

а.о., м

236.81, 236.74, 236.8, 233.7, 230.2, 231.7

202.99, 202.97, 202.78

202.87

0 500 1000 м

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

202.78

15

Рисунок 2 – Схематический гидрогеологический разрез через бассейн 354:
1-8 – техногенные грунты: 1 – уплотнённые суглинки; 2 – глины; 3 – песчано-гравийная смесь; 4 – радиоактивные донные отложения; 5 – слой первичной засыпки (супеси и суглинки); 6-8 – слои засыпки при окончательной ликвидации; 9-13 – четвертичные аллювиальные отложения: 9 – пески; 10 – гравийно-галечники; 11 – супеси; 12 – суглинки; 13 – среднеюрские глины; 14 – УГВ и уровень верховодки, м; 15 – наблюдательная скважина (б – снесённая на разрез), сбоку – абс. отм. уровня, м

В отходах, поступавших бассейн 354, основную часть сухого остатка составляли нитраты, концентрация которых изменялась от 700 до 4900 мг/л. В результате в качестве индикатора химического загрязнения далее принят нитрат-ион. Его фоновая концентрация для рассматриваемой территории составляет 4,6 мг/л.

По данным мониторинга, начиная с 2007-2010 гг., в ряде скважин, находящихся ниже по потоку грунтовых вод от бассейна 354, преимущественно у его краёв, наблюдался рост концентраций нитрат-иона с превышением фона, а затем и предельно допустимой концентрации (ПДК) для питьевых вод равной 45 мг/л (рис. 3). Таким образом, с данного времени

фиксируется химическое загрязнение грунтовых вод, источником которого является бассейн 354.

В качестве примера можно рассмотреть данные мониторинга по скважинам у северо-западного края бассейна (рис. 1). В скважинах №№ 5, 8, 8а в конце 2010 г. наблюдалось практически синхронное повышение содержания нитрат-иона в грунтовых водах (рис. 3). На графиках видно, что у северо-западного края бассейна в грунтовые воды поступил некоторый объем («пакет») загрязнения. К настоящему времени вследствие миграции в потоке грунтовых вод он миновал все скважины, поскольку концентрации в них пошли на спад. При продвижении ореола вниз по потоку заметно его разбавление.

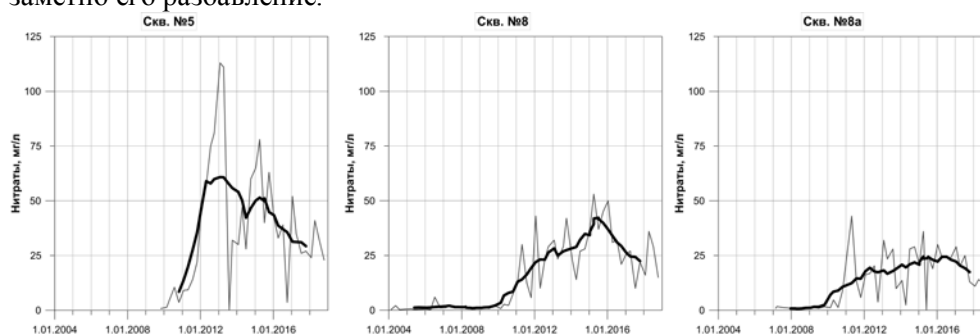


Рисунок 3 – Режим концентраций нитрат-иона в наблюдательных скважинах (жирная линия – осреднение данных методом скользящего среднего)

При этом необходимо отметить, что в водах верховодки в засыпанной чаше бассейна по данным мониторинга, начатого в 2015 г., превышения фона по нитрат-иону отсутствуют.

Таким образом, на основе проведенного анализа данных мониторинга можно заключить, что нитрат-ион практически полностью покинул засыпанную чашу бассейна 354. Результатом его миграции в отложениях ЗА стало формирование ореола загрязнения грунтовых вод.

Моделирование миграции нитрат-иона в отложениях ЗА

В качестве механизма поступления загрязнения в ЗА можно, в первую очередь, предположить его переток через нижний ПФЭ бассейна. Для оценки возможности такого механизма поступления выполнено моделирование влагопереноса и миграции нитрат-иона в ЗА в программе HYDRUS-1D с использованием модели Ван Генухтена-Муалема [3, 4]. В качестве основы использовались обобщенные геологические колонки, воспроизводящие строение ЗА под бассейном, а также строение самого бассейна во время его эксплуатации и после ликвидации. В результате при моделировании учитывалось изменение мощности столба воды на нижнем ПФЭ, который во время эксплуатации бассейна составлял 2,3 м, а после ликвидации – 5 м, что ведёт к увеличению скорости перетока через экран. В качестве верхней границы моделей принята свободная поверхность бассейна или уровень верховодки, для нижней границы – УГВ.

Гидрофизические параметры отложений ЗА приняты по данным изысканий и частично по литературным данным. Расчётные параметры

уравнения Ван Генухтена определены на основе данных о гранулометрическом составе, плотности и полевой влагоемкости отложений с использованием программы Rosetta [5]. Коэффициенты фильтрации (КФ) отложений приняты по данным изысканий. Для суглинков зоны аэрации КФ по данным лабораторных исследований принят равным 0,4-0,09 м/сут; для глин и уплотнённых суглинков ПФЭ бассейна КФ предварительно оценён величиной 10^{-5} м/сут.

В ходе расчётов было выявлено, что наиболее чувствительным параметром моделей, определяющим время поступления нитрат-иона на УГВ, является КФ грунтов экрана бассейна.

Как известно [1], КФ грунтов, содержащих глинистые минералы, может существенно меняться в зависимости от минерализации и состава фильтрующейся через них жидкости. Так, при взаимодействии с минерализованным раствором происходит разрушение диффузного слоя, который занимает рыхлосвязанная вода, и увеличение КФ. Основной прирост КФ наблюдается при повышении минерализации раствора до 10-30 г/л.

Для жидкой фазы отходов, поступавших в бассейн 354, минерализация доходила до 13,7 г/л, что могло вызвать увеличение КФ. В результате при моделировании был рассмотрен весь возможный диапазон изменения КФ грунтов экрана: от максимальных значений характерных для глин – 10^{-3} м/сут [1] до 10^{-5} м/сут. Также использовался метод расчёта, который фактически воспроизводит вариант полного разрушения диффузного слоя рыхлосвязанной воды в грунтах экрана при взаимодействии с минерализованным раствором. В результате чего происходит заполнение порового пространства подвижной водой, способной к растворению солей.

Вариант расчёта с КФ грунтов экрана 10^{-3} м/сут показал, что в данном случае фильтрационные потери из бассейна 354 слишком высоки. В потоке грунтовых вод под бассейном формируется купол растекания, что не соответствует данным наблюдений. При этом качество калибровки геофильтрационной модели по напорам ухудшается. Описанные выводы получены для модели зоны полного влагонасыщения, разработанной для изучаемой территории [2].

При КФ грунтов экрана 10^{-4} и 10^{-5} м/сут результаты геомиграционных расчётов показывают, что нитрат-ион может достичь УГВ в концентрациях, превышающих фоновые, через 27 и 140 лет после начала эксплуатации бассейна (1958 г.), соответственно. Таким образом, можно подобрать такой КФ в указанном интервале, чтобы загрязнение приходило на УГВ через 50 лет (к 2008 г.) и получить соответствие данным мониторинга.

Однако существует ряд косвенных доказательств того, что фиксируемое по скважинам повышение концентраций нитрат-иона в грунтовых водах не связано с его поступлением за счёт перетока через нижний ПФЭ. Во-первых, загрязнение фиксируется не по всем скважинам, а преимущественно по тем, что располагаются у северо-западного и северо-восточного краёв бассейна (рис. 1). Во-вторых, продолжительность прохождения «пакета» загрязнения в скважинах у северо-западного края бассейна – около 10 лет (рис. 3), а при постоянном поступлении загрязнения через дно бассейна она должна по

результатам расчётов составлять не менее 50 лет. Кроме того, в соседнем бассейне 354а (рис. 1) между аналогичными слоями ПФЭ из уплотнённого суглинки имеется слой песчано-гравийной смеси, в котором уложена дренажная сеть для сбора возможных протечек жидкой фазы. По имеющимся данным фильтрации жидкой фазы через экран не происходит, хотя бассейн эксплуатируется с 1966 г.

Таким образом, для ликвидированного бассейна 354 можно предположить другой механизм миграции нитрат-иона за пределы чаши бассейна, связанный с процессом его вывода из эксплуатации и формированием верховодки. В ходе первичной засыпки бассейна происходило выдавливание пульпы со дна и неравномерное пропитывание ею грунтов засыпки. Далее при формировании верховодки атмосферные осадки просачивались в чашу бассейна, смешиваясь с загрязнённой поровой водой. При превышении уровня верховодки над бортами ПФЭ, вероятно, происходил перелив её вод через борта и вынос нитрат-иона за пределы чаши бассейна.

Для моделирования по описанному сценарию принято, что нитрат-ион вымыт водами верховодки из чаши бассейна и сформировал вторичный источник загрязнения в отложениях ЗА. В качестве начала отсчёта принят 1990 г., что соответствует началу засыпки бассейна.

В ходе расчётов выяснилось, что время начала поступления нитрат-иона на УГВ в наибольшей степени зависит от скорости поступления воды, заданной на верхней границе модели, т.е. фактически от поступления воды за счёт перелива из чаши бассейна. Проведённая калибровка данного параметра с целью получения максимальной сходимости натуральных и модельных концентраций по трём скважинам (№№ 5, 8, 8а), показала, что при скорости поступления воды $5,5 \times 10^{-4}$ м/сут время достижения нитрат-ионом УГВ составляет около 20 лет (к 2008 г.), что согласуется с натурными данными.

Выводы

Комплексный анализ природно-техногенных условий района размещения бассейна 354 в совокупности с результатами расчётов на моделях, воспроизводящих различные сценарии миграции загрязнения в отложениях ЗА, позволил сделать следующие выводы. Формирование ореола нитрат-иона в грунтовых водах, вероятно, не было связано с перетоком загрязнения через нижний ПФЭ бассейна, а происходило за счёт перелива загрязнённых вод из его чаши, через борта ПФЭ в ходе процесса консервации, который длился около 20 лет. Перелив сопровождался выносом из чаши бассейна наиболее подвижных компонентов, таких как нитрат-ион.

Литература

1. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах—М.:Недра, 1986—160с.
2. Кононченко Е.В., Куваев А.А., Петраш А.Б. и др. Оценка воздействия промышленных бассейнов-накопителей на грунтовые и поверхностные воды с использованием численного моделирования, Охрана и разведка недр, 2018, №11, с.64-69
3. Mualem Y. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. // Water Resources Research, 1976, V. 12, P. 513-522
4. Schaap M.G., Leij F.L., van Genuchten M.Th. Rosetta. A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Hydrology. 2001. V. 251. P. 163–176
5. van Genuchten M.Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1980. V. 44. P. 892–898