УДК 556.639; 556.38

Оценка воздействия промышленных бассейнов-накопителей на грунтовые и поверхностные воды с использованием численного моделирования

Impact assessment of industrial nuclear waste wet storages on groundwater and surface water using numerical modeling

Кононченко Е.В., Куваев А.А., Петраш А.Б., Святовец С.В. (ФГБУ «Гидроспецгеология»)
Меркулов И.А., Селеев И.Н., Платонов В.В. (ФГУП «ГХК»)

Аннотация

Abstract

На основе данных гидрогеологического мониторинга и специальных изысканий разработаны геофильтрационная и геомиграционная модели участка размещения промышленных бассейнов – накопителей. Дана количественная оценка поступления загрязнения в грунтовые воды с учетом его миграции в зоне аэрации, а также дан прогноз переноса загрязнения с грунтовым потоком.

Based on hydrogeological monitoring and special survey data, hydrodynamic and solute transport models for industrial wet storages were developed. The pollutant inflow into groundwater due to the solute transport in vadose zone was quantitatively assessed; also forecast of contamination transport with groundwater flow was made.

Ключевые слова

Промышленные бассейны-накопители, численное моделирование геофильтрации и геомиграции.

Key words

Industrial wet storages for nuclear waste, numerical modeling hydrodynamic and solute transport

Введение

Бассейны-накопители, в которых осуществляется временное хранение промышленных отходов и стоков, в том числе жидких радиоактивных отходов (ЖРО), являются потенциально опасными объектами, которые могут негативно влиять на окружающую среду.

Техногенные радионуклиды и компоненты химического загрязнения (контаминанты) могут мигрировать из бассейнов, формируя ореолы загрязнения в грунтовых водах. При наличии зоны аэрации значительной мощности (десятки метров) поступление контаминантов на уровень грунтовых вод (УГВ) происходит с задержкой, иногда весьма существенной, которая определяется условиями формирования инфильтрационного питания, а также водно-физическими и сорбционными свойствами отложений зоны аэрации.

Целью данной работы является оценка воздействия бассейнов-накопителей (ликвидированного и действующего) на грунтовые и поверхностные воды с использованием численного моделирования миграции загрязнения в зоне аэрации и в зоне полного влагонасыщения.

Геологическое строение и гидрогеологические условия территории исследований

Бассейны-накопители расположены в долине р. Енисей (рисунок 1). Террасовый комплекс аллювиальных отложений долины р Енисей подстилается толщей песчано-глинистых пород среднеюрского возраста, в основании которой залегает архейский

кристаллический фундамент. В строении террас выделяются русловая и пойменная фации аллювия. Русловая фация представлена преимущественно гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем и песками. Пойменная фация сложена суглинками с прослоями супесей и песков (рисунки 2, 3). К аллювиальным отложениям террас р. Енисей приурочен грунтовый водоносный горизонт, относительным водоупором для которого является толща юрских глинистых отложений.

Суммарная мощность аллювиальных отложений террасового комплекса доходит до 47 м. Мощность обводненных аллювиальных отложений, которые относятся преимущественно к русловой фации, составляет от 1 - 2 до 10-15 м. Мощность зоны аэрации под бассейнами 354 и 354а составляет 30-35 м. Верхняя часть зоны аэрации представлена суглинками, нижняя – гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем и песками (рисунки 1, 2). Принимая во внимание значительную мощность зоны неполного влагонасыщения (зоны аэрации) на участке размещения бассейнов 354 и 354а, с целью количественной оценки ее изолирующих свойств, как природного барьера, моделирование геофильтрации и геомиграции выполнялось отдельно для зоны аэрации и зоны полного влагонасыщения.

Характеристика бассейнов 354 и 354а

Бассейны-накопители 354 и 354а предназначены для приёма и временного хранения промышленных отходов и стоков. Эксплуатация бассейна 354 осуществлялась с 1958 по 1978 г. Бассейн 354а эксплуатируется с 1966 г. по настоящее время. Вывод из эксплуатации бассейна планируется ориентировочно в 2050 г. Бассейны сооружены на естественном грунтовом основании, чаши бассейнов сформированы заглублением в грунт, а также отсыпкой дамб местным грунтом (суглинками). Основания бассейнов и внутренние стенки откосов дамб в чаше оборудованы противофильтрационными экранами (далее ПФЭ) (рисунок 2). На участке бассейна 354 ПФЭ представлен следующими слоями (снизу вверх): уплотнёнными суглинками (0,8 м), глинами (0,5 м) и песчано-гравийной смесью (0,15 м). На участке бассейна 354а ПФЭ сложен: двумя слоями уплотнённого суглинка мощностью 0,5 и 0,8 м, между которыми расположен слой песчано-гравийной смеси мощностью 0,5 м.

Состав жидких низкоактивных отходов, поступавших в оба бассейна, характеризуется следующими основными показателями: сухой остаток – от 3,7 до 7 г/л, суммарная α-активность (Σα) – не более 70 Бк/л, суммарная β-активность (далее Σβ) – от 33 до 159 кБк/л. Основную часть сухого остатка составляют нитраты, концентрация которых изменяется от 700 до 4900 мг/л. В Σβ наибольший вклад вносит ^{137}Cs, также присутствуют такие радионуклиды, как ^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{60}Co. В отходах также содержится тритий, хотя его объёмная активность не определялась.

В 1990-1991 гг. были выполнены работы первого этапа ликвидации бассейна 354, заключающиеся в перекачке жидкой фазы в бассейн 354а и первичной засыпке местными грунтами, представленными супесью и суглинком. Первичная засыпка составила около 80% площади бассейна. В результате жидкая фаза оставалась только в восточной его части. После начала засыпки отходы в бассейн 354 более не сбрасывались. В 2008 г. бассейн 354 был окончательно ликвидирован путем послойной отсыпки.

В контуре ранее существовавшей чаши бассейна 354 после его ликвидации было пробурено три скважины. Они показали наличие горизонта верховодки, который стал формироваться после начала засыпки бассейна на относительно слабопроницаемых грунтах ПФЭ. Уровень верховодки вскрывается скважинами на глубине 1,1-3 м в зависимости от сезона года и располагается выше бортов ПФЭ (рисунок 2). Сезонные колебания уровня верховодки, проявляющиеся в его снижении после периода снеготаяния и обильных дождей, указывают на отток воды, который происходит за счёт перелива через борта ПФЭ, а не за счёт перетока через нижний экран, поскольку коэффициент

фильтрации грунтов засыпки бассейна (супесей, суглинков) и суглинков зоны аэрации на порядки выше фильтрационных коэффициента фильтрации ПФЭ.

Результаты гидрогеологического мониторинга

В соответствии с составом ЖРО бассейнов система мониторинга состояния подземных вод включает в себя определение в пробах воды нитрат-иона, а также Σα и Σβ один раз в квартал. С 2015 г. в пробах воды также контролируют объёмную активность трития один раз в год.

В качестве основного индикатора радиоактивного загрязнения грунтовых вод рассматривается Σβ, которая характеризует, в основном, объёмную активность ^{90}Sr (объёмная активность трития определяется отдельно и не входит в Σβ). В качестве индикатора химического загрязнения грунтовых вод рассматривается нитрат-ион.

Фоновая концентрация нитрат-иона для рассматриваемой территории составляет 4,6 мг/л, фоновое значение Σβ – 1 Бк/л (совпадает с критерием предварительной оценки – КПО по НРБ-99/2009).

Начиная с 2007-2010 гг. в большинстве скважин, находящихся ниже по потоку грунтовых вод от бассейна 354, наблюдался рост концентраций нитрат-иона с превышением естественного фона. Из этого можно заключить, что с данного времени фиксируется химическое загрязнение грунтовых вод, источником которого является бассейн 354.

Можно заключить, что у северо-западного края бассейна в грунтовые воды практически единовременно поступил некоторый объем («пакет») загрязнения. При продвижении ореола вниз по потоку заметно его разбавление, проявляющееся в снижении концентраций нитратов.

На основе проведённого анализа данных мониторинга можно заключить, что в настоящее время нитрат-ион практически полностью покинул засыпанную чашу бассейна 354. ^{90}Sr, как наиболее подвижный из сорбируемых радионуклидов, также мог выйти за пределы чаши и экранов бассейна.

В качестве механизма поступления загрязнения в зону аэрации можно, в первую очередь, предположить его переток через ПФЭ в основании бассейна. Для оценки возможности такого механизма поступления выполнено моделирование влагопереноса и миграции контаминантов в зоне аэрации.

Моделирование миграции загрязнения в зоне аэрации

Моделирование влагопереноса и миграции компонентов в отложениях зоны аэрации проводилось с использованием расчетного кода HYDRUS-1D [4], основанного на математической модели Ван-Генухтена-Муалема [5].

Водно-физические параметры грунтов зоны аэрации были приняты по данным изысканий и частично по литературным данным. Расчетные параметры уравнения Ван Генухтена определены на основе данных о гранулометрическом составе, плотности и полевой влагоемкости отложений с использованием программы Rosetta [3]. Коэффициенты фильтрации отложений и грунтов засыпки бассейна приняты по данным изысканий. Для глин и уплотнённых суглинков ПФЭ бассейна коэффициент фильтрации по данным лабораторных исследований составляет 10^{-5} м/сут, для суглинков зоны аэрации – 0,4-0,09 м/сут.

Геомиграционные расчеты проводились на основе результатов моделирования влагопереноса. В качестве моделируемых показателей загрязнения рассмотрены нитрат-ион и ^{90}Sr. Источник загрязнения задавался в слое воды бассейна в виде начальных значений концентрации нитрат-иона или объёмной активности ^{90}Sr. В ходе расчётов учитывались процессы дисперсии, сорбция ^{90}Sr породами зоны аэрации и его радиоактивный распад.

Для ^{90}Sr коэффициент распределения «вода-порода» (K_d) определён в соответствии с данными лабораторных измерений, предоставленных предприятием, для отложений зоны аэрации и грунтов засыпки бассейна. Для суглинков он составил 0,035-0,045 $м^3$/кг.

Результаты геомиграционных расчётов в принятом консервативном варианте моделирования показали, что нитрат-ион может достичь УГВ в концентрациях, превышающих фоновые, только через 140 лет после начала эксплуатации бассейна (1958 г.) в случае, если принять концентрации нитрат-иона в бассейне 354 постоянными, соответствующими их максимальным наблюденным значениям. Таким образом, превышения фоновых значений по нитрат-иону в грунтовых водах, которые фиксируются в наблюдательных скважинах с 2007 г., не могут быть связаны с миграцией компонента через нижний ПФЭ бассейна. Аналогичный результат был получен и на модели бассейна 354а, для которого время достижения нитрат-ионом УГВ составляет 180 лет от начала эксплуатации бассейна (1966 г.). По результатам моделирования выход ^{90}Sr через ПФЭ бассейна 354 в значимых концентрациях не происходит вследствие высоких K_d, характерных для данного радионуклида.

Анализ данных мониторинга позволяет предположить, что современное загрязнения подземных вод нитратами на участке бассейна 354 сформировалось вследствие перелива жидкости, содержащейся в бассейне, через его края при засыпке.

Моделирование миграции нитратов в зоне аэрации для такого сценария геомиграционной модели показало, что время достижения нитрат-ионом УГВ составляет 20 лет, что согласуется с натурными данными.

На рисунке 4 представлены результаты моделирования влагопереноса и миграции нитрат-иона в отложениях зоны аэрации. Проведённые расчёты показывают, что в верхней части зоны аэрации, сложенной преимущественно суглинками, скорость движения фронта загрязнения существенно меньше, чем в нижней части, представленной гравийно-галечниками. Данные различия связаны с изменением объёмной влажности отложений, обусловленной их водно-физическими свойствами. В суглинках объёмная влажность составляет около 0,2 $м^3/м^3$, что в 4 раза выше по сравнению с нижней частью разреза (0,05 $м^3/м^3$). На рисунке 4 видно, что при прохождении ореола в верхней части разреза зоны аэрации максимальные относительные концентрации снижаются с 1 до 0,4 за счёт гидродинамической дисперсии. При достижении фронтом загрязнения гравийно-галечников скорость миграции нитрат-иона возрастает в 4 раза.

Прохождение «пакета» нитрат-иона в грунтовом потоке через систему наблюдательных скважин по модельным расчётам должно закончится ориентировочно в 2021 г. Снижение концентраций нитрат-иона, как было сказано выше, в настоящее время уже наблюдается в скважинах.

Таким образом, проведённые расчёты подтверждают, что наблюдаемое повышение концентраций нитрат-иона в грунтовых водах может быть обусловлено переливом вод верховодки через борта ПФЭ бассейна.

Геомиграционные расчёты также показали, что ^{90}Sr при переливе вод верховодки через борта ПФЭ законсервированного бассейна не поступает в зону аэрации, а остается в грунтах засыпки вследствие их высоких сорбционных свойств. Таким образом, можно сделать вывод, что в случае вывода из эксплуатации бассейна 354 методом консервации накопленных донных осадков и загрязнённых грунтов на месте, риск радиоактивного загрязнения грунтовых и поверхностных вод отсутствует.

Для определения массы нитрат-иона, которая поступила или потенциально может поступить из зоны аэрации в поток грунтовых вод, а также для оценки влияния уже сформировавшихся или потенциально возможных ореолов нитрат-иона на поверхностные воды, в частности р. Енисей, выполнено геомиграционное моделирование для зоны полного влагонасыщения.

Разработка геофильтрационной модели зоны полного влагонасыщения

Для моделирования миграции нитрат-иона в потоке грунтовых вод с использованием программного комплекса GMS 10 [2] была разработана геофильтрационная модель.

Границы области моделирования показаны на рисунке 1. На западе и востоке модели задавались непроницаемые границы вдоль предполагаемых линий тока. На юге модели была также задана непроницаемая граница, поскольку в ходе калибровки было установлено, что приток через данную границу незначителен, что связано с выклиниванием водоносного горизонта 7-й террасы р. Енисей.

Нижняя непроницаемая граница модели задана по кровле относительно водоупорных среднеюрских пород, сложенных глинами и песчаниками. Верхняя граница модели задана по зеркалу грунтовых вод, которое предварительно принято по результатам интерполяции уровней в скважинах.

Модули инфильтрационного питания на участках бассейнов 354 и 354а заданы по результатам моделирования влагопереноса в зоне аэрации. Эвапотранспирация грунтовых вод происходит только в северной части области моделирования, примыкающей к р. Енисей, где УГВ располагается вблизи дневной поверхности. Модуль эвапотранспирации со свободной поверхности грунтовых вод при нулевой глубине её залегания принят 4.5×10^{-4} м/сут по данным объекта-аналога и не калибровался. Критическая глубина залегания УГВ, для которой эвапотранспирация снижается до нуля, принята 3 м.

Режим геофильтрационного потока на модели принят стационарным. Калибровка модели проведена на основе осреднённых значений уровней наблюдательных скважин за весь период наблюдений. Стандартное отклонение модельных уровней от натурных составило 0,31 м. В результате калибровки геофильтрационной модели были уточнены коэффициенты фильтрации аллювиальных отложений террас долины р Енисей. Величина инфильтрационного питания 2×10^{-4} м/сут по результатам калибровки была оставлена без изменений.

Моделирование распространения нитрат-иона в потоке грунтовых вод от бассейнов 354 и 354а

Геомиграционное моделирование проводилось на основе откалиброванной геофильтрационной модели. В ходе геомиграционных расчётов была выполнена калибровка источников загрязнения подземных вод нитратами на участках бассейнов 354 и 354а.

На рисунке 5 представлен современный модельный ореол нитрат-иона (на конец 2017 г.) на участке бассейна 354. Как видно, в настоящее время орел нитратов не достигает р. Енисей. По данным прогнозных расчётов максимальное поступление нитрат-иона в р. Енисей в результате поступления их из водоема 354 вследствие его засыпки не превысит 3,5 кг/сут. Учитывая, то, что расход р Енисей в зимнюю межень составляет 300-500 $м^3$/с), приращение концентрации нитрат-иона в реке после перемешивания не превысит 5×10^{-5} мг/л, что существенно ниже погрешности измерений.

Дополнительно на разработанной модели были также проведены расчёты ореолов нитрат-иона в региональном потоке, которые при реализации консервативного варианте прогноза могут сформироваться в потоке грунтовых вод вследствие перетока нитратов через ПФЭ бассейнов 354 и 354а.

Прогнозные максимальные модельные ореолы нитрат-иона от бассейнов 354 и 354а представлены на рисунке 6. Разгрузка ореолов в р. Енисей завершается примерно к 2280 г. (от бассейна 354) и 2410 г. (от бассейна 354а). При этом разгрузка нитрат-иона в р. Енисей не будет превышать 13 кг/сут, а приращение концентрации нитратов в реке, как и в предыдущем случае, будет ниже погрешности измерений.

Заключение

На основе анализа информации о технологических условиях эксплуатации и вывода из эксплуатации бассейна 354, данных мониторинга и результатов геомиграционных расчётов установлен механизм поступления нитрат-иона в поток грунтовых вод вследствие перелива загрязненных вод из чаши бассейна через борта ПФЭ бассейна 354 при его ликвидации. Перелив сопровождался выносом из чаши бассейна наиболее подвижных компонентов, таких как нитрат-ион и тритий.

Тритий практически не сорбируется породами и должен мигрировать с той же скоростью, что и нитрат-ион. Отсутствие существенных превышений нормативов по тритию в грунтовых водах свидетельствует о том, что данный радионуклид не достигает УГВ вследствие быстрого радиоактивного распада.

Сорбируемые β-излучающие радионуклиды, в том числе ^{90}Sr, по результатам расчётов не покидают чаши бассейна и остаются в ней в сорбированном состоянии. Максимальное время необходимое для полного распада радионуклидов в чаши бассейна 354 составляет порядка 600 лет со времени накопления донных осадков, что в рассматриваемых условиях соответствует 2550 г.

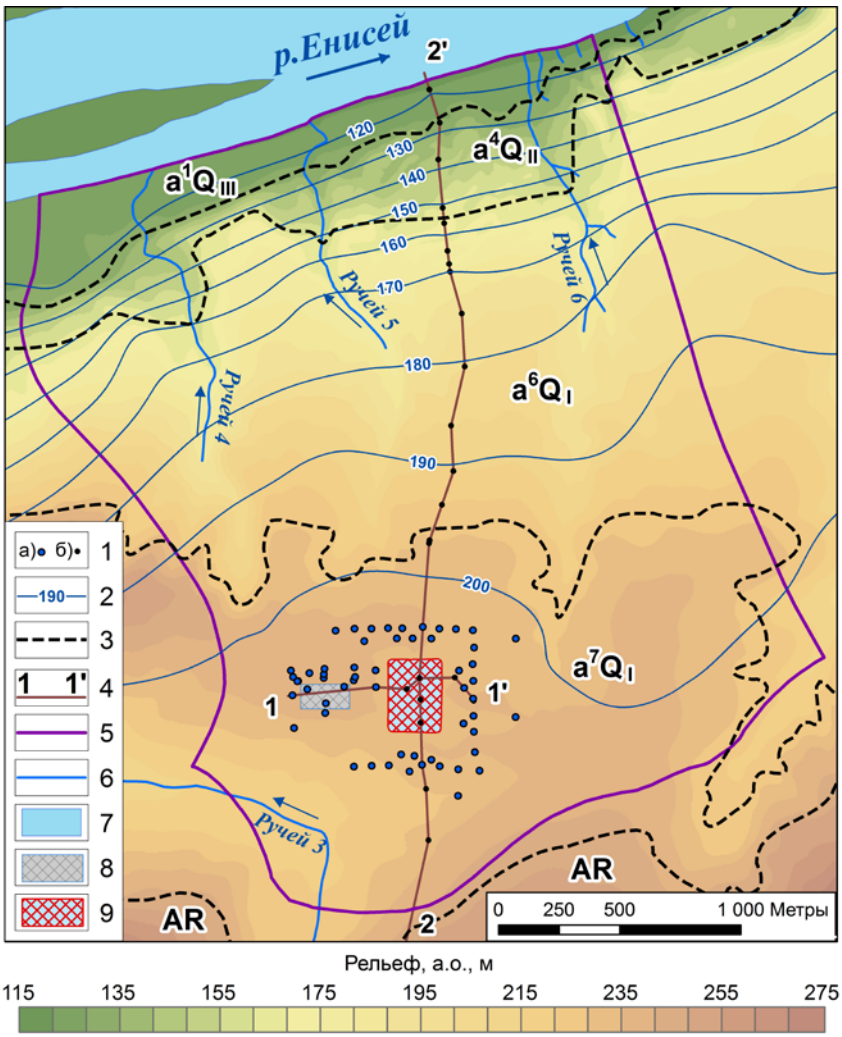
Таким образом, результаты моделирования показывают, что риск загрязнения грунтовых и поверхностных вод радионуклидами на участке бассейна 354 отсутствует.

Моделирование показало, что при разгрузке прогнозных ореолов нитрат-иона в р. Енисей приращение концентрации компонента в водах реки после перемешивания не превысит погрешности измерений.

Проведенные исследования показали важность использования численного моделирования при проведении и интерпретации данных мониторинга в сложных природно-техногенных условиях.

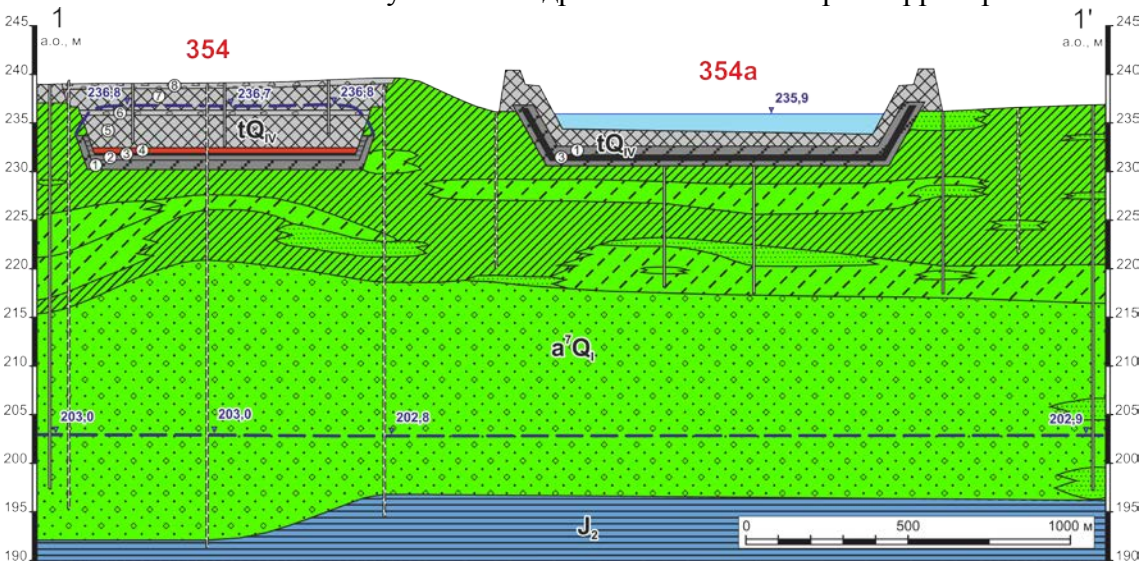
ЛИТЕРАТУРА

1. Шестаков В.М., Поздняков С.П. Геогидрология. Изд. ИКЦ “АКАДЕМКНИГА”. 2003, 176с.
2. GMS User Manual, volume 1-4, 2014.
3. *Schaap M.G., Leij F.L., van Genuchten M.Th.* Rosetta. A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. // J. Hydrology. 2001. V. 251. P. 163–176.
4. *Šimůnek J., van Genuchten M. Th. and Šejna M.* The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Technical manual. Version 4.16. Preprint DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCES UNIVERSITY OF CALIFORNIA RIVERSIDE RIVERSIDE, CALIFORNIA. 2013, 340p.
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.



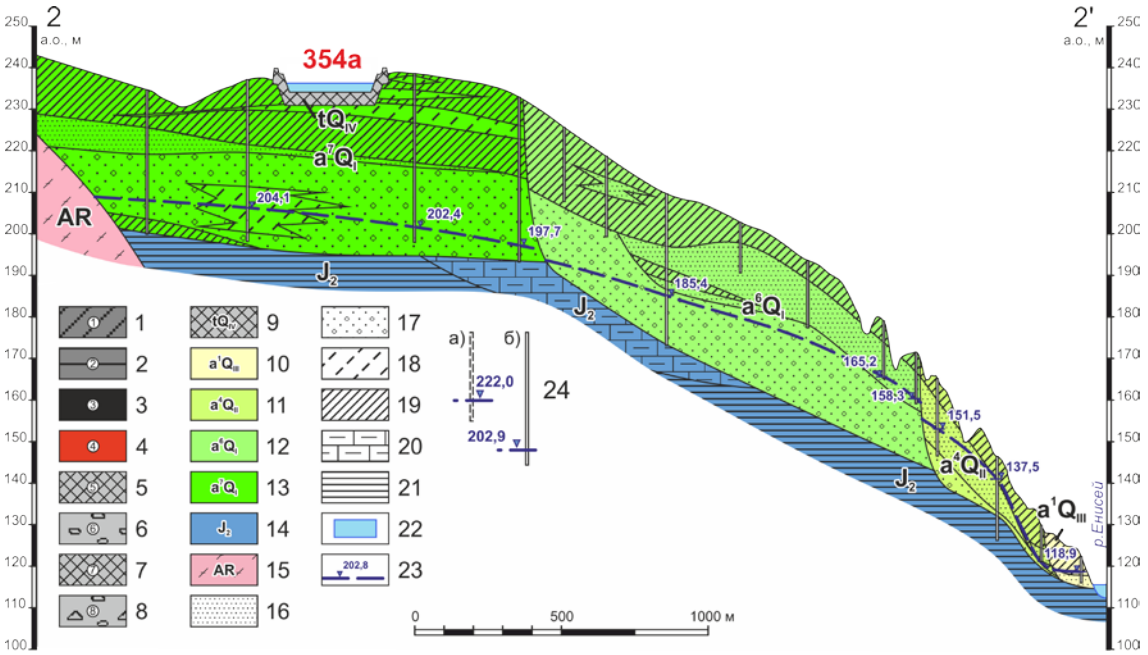
1 – скважины: наблюдательные (а), инженерно-геологические (б); 2 – гидроизогипсы четвертичного водоносного горизонта с шагом 10 м; 3 – границы надпойменных террас р. Енисей; 4 – линия гидрогеологического разреза; 5 – границы области моделирования; 6 – ручьи; 7 – р. Енисей; 8 – ликвидированный бассейн 354; 9 – бассейн 354а

Рисунок 1 – Гидрогеологическая карта территории



Условные обозначения смотреть на рисунке 3

Рисунок 2 – Схематический гидрогеологический разрез по линии 1-1’



1-8 – техногенные отложения ПФЭ и засыпки бассейнов 354 и 354а: 1 – уплотнённые суглинки; 2 – глины; 3 – песчано-гравийная смесь; 4 – радиоактивные донные отложения бассейна 354; 5 – слой первичной засыпки бассейна 354 из супеси и суглинка; 6-8 – слои засыпки бассейна 354 после окончательной ликвидации; 9 – техногенные отложения; 10-13 – четвертичные аллювиальные отложения надпойменных террас р. Енисей; 14 – среднеюрские отложения; 15 – отложения архейского возраста (гнейсы); 16 – пески; 17 – гравийно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем; 18 – супеси; 19 – суглинки; 20 – песчаники; 21 – глины; 22 – водоём 354а; 23 – уровень грунтовых вод, м; 24 – наблюдательная скважина (а – снесённая на разрез), цифры: вверху – номер скважины, сбоку – УГВ, м

Рисунок 3 – Схематический гидрогеологический разрез по линии 2-2’

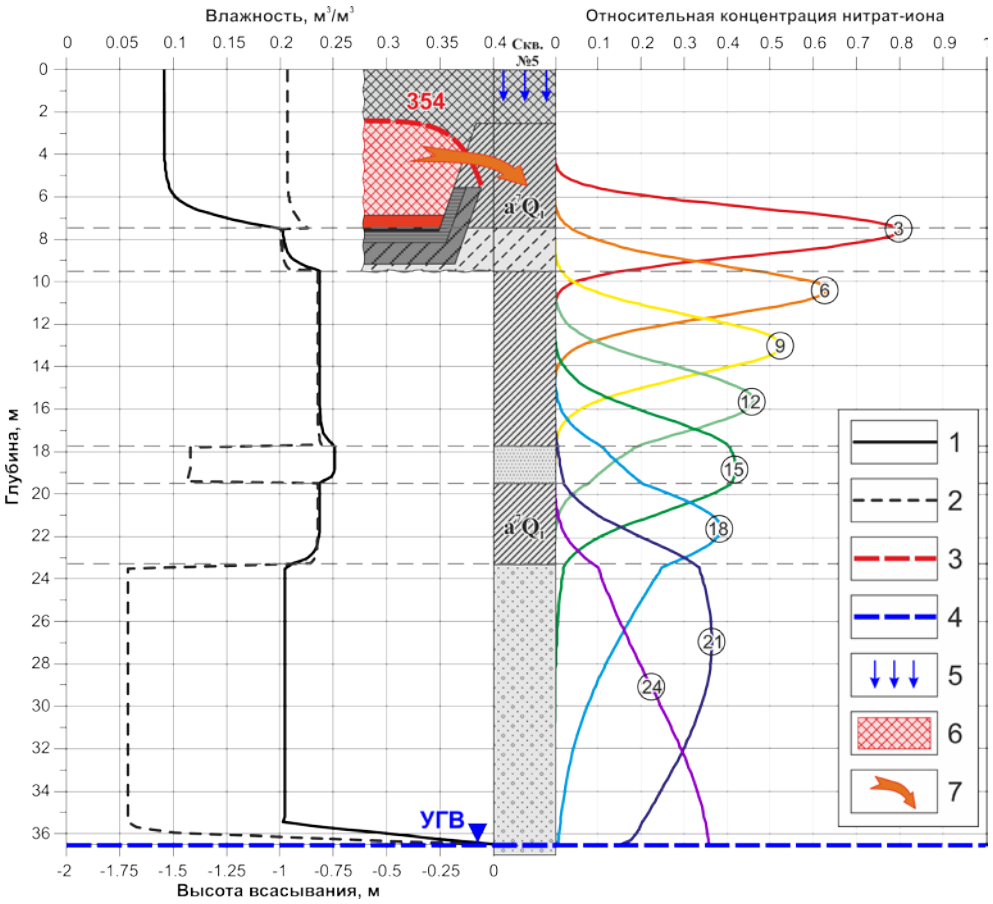
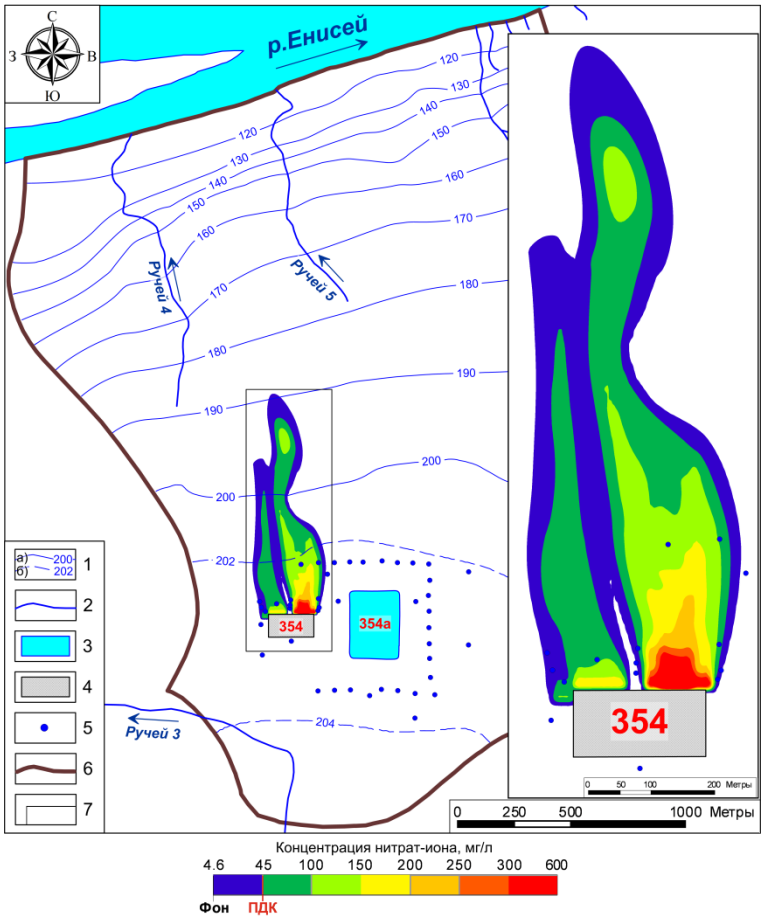
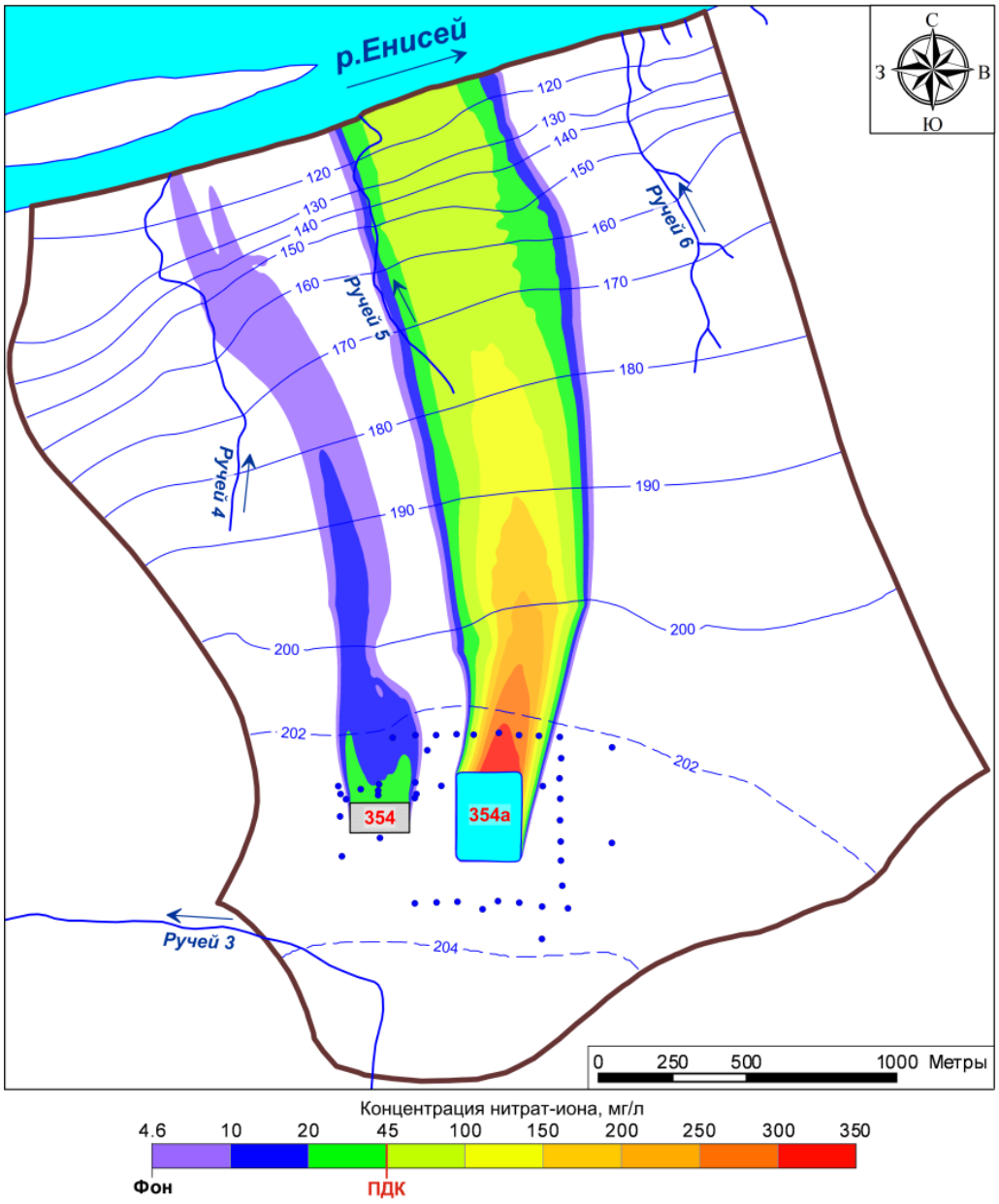


Рисунок 4 – Расчётные кривые распределения концентраций нитрат-иона в зоне аэрации (шифр кривых соответствует расчётному году): 1 – относительная влажность грунтов зоны аэрации; 2 – высота всасывания, м; 3 – уровень верховодки в бассейне 354; 4 – уровень грунтовых вод; 5 – инфильтрационное питание; 6 – область загрязнённых грунтов в бассейне 354; 7 – участок поступления нитрат-иона в зону аэрации за счёт перелива вод верховодки из бассейна 354



1 – модельные гидроизогипсы четвертичного водоносного комплекса: основные, с шагом 10 м (а) и вспомогательные, с шагом 2 м (б); 2 – ручьи; 3 – бассейн 354а; 4 – ликвидированный бассейн 354; 5 – наблюдательные скважины; 6 – границы области моделирования; 7 – границы карты-врезки

Рисунок 5 – Современный модельный ореол нитрат-иона (на конец 2017 г.) на участке бассейна 354



Условные обозначения смотреть на рисунке 4

Рисунок 6 – Прогнозные максимальные модельные ореолы нитрат-иона от бассейнов 354 и 354а