

УДК 556.3:621.039.75

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И НЕРАДИОАКТИВНЫХ ПРОМСТОКОВ В ГЛУБОКИЕ ГОРИЗОНТЫ

М.К. ШАРАПУТА, Н.В. ЧУЛКОВ

АО «ВНИПИПРОМТЕХНОЛОГИИ»

Статья посвящена осмыслению гидрогеологического прогнозирования при захоронении радиоактивных отходов в глубокие горизонты земной коры. Показана роль прогнозных расчетов, выполненных в середине XX века при создании пунктов глубинного захоронения, в реализации технологий обращения с радиоактивными отходами. Проведен анализ развития методов прогнозирования при эксплуатации объектов захоронения. Выдвинуты предположения относительно будущего применения гидрогеологических прогнозов в данной области практической деятельности.

Ключевые слова: прогнозирование, моделирование, глубинное захоронение, жидкие радиоактивные отходы (ЖРО).

ВВЕДЕНИЕ

Захоронение жидких радиоактивных отходов в глубокие горизонты земной коры через буровые скважины в нашей стране ведется с 60-х годов XX века. Эта технология начала применяться в связи с необходимостью изоляции от окружающей среды большого количества радиоактивных отходов, образующихся на основных предприятиях атомной промышленности по получению материалов в оборонных целях, – ФЯО ФГУП¹ «Горно-химический комбинат» в г. Железногорске (Красноярский край), АО¹ «Северский химический комбинат» в г. Северске (Томская область), АО¹ «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» в г. Димитровграде (Ульяновская область), и в связи с большой опасностью сброса отходов на поверхность земли, в поверхностные водоемы и водотоки, хранением отходов в специальных сооружениях.

¹ Организационно-правовая форма организации по состоянию на 2016 г.

HYDROGEOLOGICAL FORECASTING WHEN DUMPING LIQUID RADIOACTIVE WASTE AND NON-RADIOACTIVE WASTE IN DEEP HORIZONS

М.К. SHARAPUTA, N.V. CHULKOV

The article is devoted to understanding of hydrogeological prediction in the disposal of radioactive waste in deep horizons of the earth's crust. The role of predictive calculations carried out in the middle of the XX century with the establishing points of deep disposal, the implementing the radioactive waste management technologies. The analysis of predicting methods in the operation of the burial objects. Suggested regarding the future use of hydrogeological forecasts in this practice area.

KEYWORDS: forecasting, modeling, deep burial, liquid radioactive waste (LRW)..

Один из основных вопросов принципиальной возможности и безопасности применения глубинного захоронения как метода локализации и изоляции отходов – возможность предсказания (прогнозирования) поведения и миграции компонентов радиоактивных отходов в период эксплуатации пунктов (полигонов) глубинного захоронения и после прекращения эксплуатации для длительных периодов времени — сотен и тысяч лет. Прогнозирование осуществляется на основе расчетов с использованием представлений (моделей) о строении и свойствах геологической среды, о протекающих процессах.

Созданию пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в СССР предшествовали специальные геологоразведочные работы и исследования, позволившие получить необходимый минимум результатов для принятия технических решений о сооружении экспериментальных установок и опытных объектов, а также прогнозирования последствий будущих захоронений. Наиболее ответственными эти прогнозы были для объектов в Северске и Железногорске, где для захоронения (удаления, закачки) были

выбраны песчано-глинистые горизонты, содержащие пресные воды и залегающие на глубинах 180–500 м, характеризующиеся высокими скоростями естественного движения подземных вод. На объекте в г. Дмитровграде для захоронения были выбраны горизонты зоны застойного режима на глубинах более 1000 м, содержащие высокоминерализованные воды со скоростями естественного движения первые сантиметры в год. К тому времени уже имелся опыт использования подобных горизонтов для закачки попутных вод нефтяных месторождений и отходов различных отраслей промышленности в США [4].

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Одним из методов научного исследования процессов, происходящих в земной коре, является прогнозирование. Оно находит все большее применение в решении задач, связанных с использованием недр в различных целях, в том числе в работах, касающихся решения гидрогеологических проблем захоронения отходов в глубокие геологические горизонты. В настоящее время под прогнозированием процессов, связанных с глубинным захоронением отходов, понимается научно обоснованное суждение о возможных состояниях геологической среды в будущем на основе имеющихся сведений о ее строении и свойствах и накопленного опыта использования недр в этих целях.

Первыми шагами в создании методологии прогнозирования были гидрогеологические прогнозные оценки на качественном уровне в начале и середине XX столетия. К настоящему моменту методология прогнозирования является основой для получения достаточно надежных данных о распространении компонентов отходов в геологической среде, протекающих процессах, для оценок последствий и возможных воздействий на окружающую среду.

Немаловажной составляющей прогнозирования является подготовка исходных данных, в состав которых входит: набор параметров и характеристик геологической среды и происходящих в ней процессов фильтрации подземных вод и массопереноса растворенных веществ, представляемых обычно в виде базы данных; установление закономерностей распределения этих характеристик и параметров в объеме геологической среды — области фильтрации — в той или иной степени соответствующих реальной ситуации. Эта информация необходима для математического описания процессов фильтрации и массопереноса в виде уравнений второго порядка в частных производных.

Часто выдвигаются вполне обоснованные сомнения в точности или достоверности прогнозов, целесообразности использования прогнозов для решения ответственных инженерных задач. Особенно это касается долгосрочных прогнозов, адекватность которых может быть проверена на практике спустя десятки и

сотни лет. В результате этого могут быть не обоснованно отклонены проекты и эффективные инженерные решения использования недр в различных целях, в том числе для захоронения отходов, охраны окружающей среды, разработки месторождений, или приняты другие проекты без прогнозирования последствий их реализации, что может привести к нежелательным, а иногда катастрофическим последствиям.

В связи с этим необходимо разработать методы оценки достоверности гидрогеологических прогнозов, которые могли бы использоваться для принятия решений о принципиальной возможности прогнозирования на основании имеющейся информации, о безусловной приемлемости выполненных прогнозов или для отказа от их учета, о проведении дополнительных исследований и расчетов для получения более достоверных прогнозов.

Оценку достоверности гидрогеологических прогнозов и разработку соответствующих методических подходов необходимо рассматривать для основных этапов прогнозирования:

- получение исходных данных о геологическом строении и гидрогеологических условиях рассматриваемой области прогнозирования, создание баз данных, используемых для прогнозирования и моделирования;
- обоснование на этой основе представлений о геологической среде и процессах, проверка правильности этих представлений и их адекватности реальным условиям;
- обоснование математических моделей геологической среды и процессов;
- проведение расчетов с использованием вычислительных программ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Основным методом прогнозирования процессов геофильтрации и геомиграции подземных вод и размещаемых в недрах отходов в настоящее время является математическое моделирование. Суть метода заключается в выявлении общих закономерностей, характерных для всей моделируемой системы в целом [5]. При математическом моделировании систем наиболее ярко проявляется эффективность единства качественных и количественных методов исследования. Модель создается для ответа на множество вопросов о моделируемом объекте. Для получения полной картины функционирования системы, она изучается с различных точек зрения. В основе модельного анализа лежит выбор концептуальной модели. Весьма неожиданным является тот факт, что примерно в 20–30% случаев такой выбор на основе имеющихся эмпирических данных оказывается неверным [8]. Гидрогеолог использует субъективный подход к описанию моделируемого объекта или процесса, что может вносить субъективную составляющую в модель. Строение и свойства

геологической среды, характер протекающих в ней процессов известны с некоторой долей условности, что обуславливает неопределенность модели. Исключение неопределенности из процесса моделирования можно достичь сравнением нескольких концептуальных моделей при расчете на относительно короткий срок. При вычислениях на длительный период времени влияние выбора концептуальной модели на результат существенно возрастает. Если концептуальная модель выбрана верно, то, как правило, результаты, получаемые при расчетах, применимы к рассматриваемой системе. Кроме того, в таком случае удастся получить новые представления и данные о системе, ранее не входившие в задачи моделирования. В противном случае модель подлежит пересмотру концептуальных подходов и доработке. Критерием адекватности модели служит практика.

Достоинства метода математического моделирования неоспоримы. Главное из них заключается в том, что модель представляет собой формализованную запись законов природы, управляющих функционированием системы. К основным трудностям при создании модели, кроме выбора концептуального подхода, относится наличие достаточного количества исходных данных надлежащего качества.

В середине прошлого века при проектировании пунктов глубинного захоронения отходов проводились прогнозные расчеты распространения компонентов отходов в геологической среде. В основе этих расчетов лежали теоретические подходы нефтяной гидродинамики, что позволяло получать поля напоров и режим заполнения пластов-коллекторов отходами. При этом принимался ряд достаточно серьезных допущений. Результаты таких расчетов давали большой запас надежности, что позволяло предположить и доказать безопасность такого метода обращения с жидкими отходами [7].

При исследовании фильтрации и в прогнозных расчетах также применялось физическое (аналоговое) моделирование, которое заключалось в использовании физических аналогий, позволяющих рассматривать сходные физические процессы вместо процессов фильтрации.

Наиболее широкое применение получили модели, основанные на электрогидродинамической аналогии (ЭГДА). В них получаемые сетки линий равного потенциала и линий электрического тока играли роль сетки движения подземных вод, состоящей из линий равного напора и линий тока [2].

В 1970–1980 годах следующим этапом в прогнозных расчетах при захоронении отходов стали расчеты на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ). Это позволило максимально приблизить модель к реальным условиям геологической среды и повысить точность расчетов. К тому времени был накоплен достаточный материал по наблюдательной сети

для проверки достоверности прогнозов, в результате чего получаемые расчеты находили практическое подтверждение. В основе расчетов фильтрации подземных вод на ЭВМ лежат следующие группы методов: вероятностно-разностный метод конечных элементов и метод конечных разностей.

На данный момент существует ряд проблем, с которыми сталкиваются исследователи при моделировании прогнозных условий распространения жидких отходов в геологических формациях.

Основная проблема, которая была и, вероятно, останется – это создание геофильтрационной и геомиграционной моделей, максимально отвечающих реальным географическим, геолого-гидрогеологическим и гидрогеохимическим условиям. Причиной существования данной проблемы является условность при описании природно-техногенных процессов и явлений в виде математической модели. Свойства и характеристики геологической среды достоверно известны только в отдельных точках – буровых скважинах. Природная неоднородность геологической среды и невозможность получения детальной информации о ее строении и свойствах вынуждают прибегать к условным и усредненным параметрам с применением методов интерполяции и экстраполяции. Попытки описать математически природные условия всегда сопровождаются определенной долей погрешности даже при хорошей изученности геологической среды и применении мощных вычислительных систем, неограниченном запасе времени и профессионализме исследователя. Зависимость погрешности и затрат можно приблизительно представить в виде гиперболической функции ($y = \frac{1}{x}$), т.е. увеличение затрат после определенного момента несет лишь незначительное уменьшение погрешности. Здесь возникает вопрос о рациональности ее уменьшения, что приводит к поиску некоего компромисса. К сожалению, в большинстве случаев процесс создания математической модели уже изначально имеет определенные ресурсные ограничения, и в итоге, работа сводится к адаптации расчетов в этих рамках.

При оказании какого-либо техногенного воздействия на природную систему она тем самым выводится из равновесия, что неизбежно влечет за собой развитие процессов, направленных на его восстановление, в результате чего природная система преобразуется в природно-техническую систему. В случае с глубинным захоронением, помимо гидродинамического воздействия, жидкие отходы оказывают влияние на состав подземных вод, изменяя его в результате физико-химических, биологических процессов и реакций радиоактивного распада. В результате этого возможны дополнительные физико-химические реакции с горными породами и образование новых соединений. Все эти процессы играют важную роль в распространении отходов в геологической среде. Однако учесть

их все зачастую довольно сложно в виду неполноты данных, несовершенства программных комплексов и других причин, что в целом отсылает к основной проблеме – созданию геофильтрационной и геомиграционной моделей, максимально отвечающих реальным географическим, геолого-гидрогеологическим и гидрогеохимическим условиям.

Более конкретной проблемой, которая непосредственно влияет на достоверность прогнозных расчетов геофильтрационной и геомиграционной математических моделей, является качество и объем исходных данных. Многие ученые (П.П. Костин, Ф.М. Бочевер, В.А. Боровская и др.), стоявшие у истоков отечественного глубинного захоронения жидких отходов, указывали на этот аспект и выдвигали его в первые ряды среди других. От качества и количества исходных данных зависит понимание природно-технической системы, ее строения, закономерностей и процессов. В настоящее время этот вопрос является ключевым. По данным Н.Н. Веригина, погрешность определения геофильтрационных параметров коллекторских горизонтов составляет ~30% [3]. Если фондовые материалы по геолого-гидрогеологическим условиям имеются в относительно большом объеме (хотя это не всегда так), то современных данных мониторинга в большинстве случаев не хватает. Это является следствием неизбежной ограниченности количества точек наблюдений – наблюдательных скважин, а также объемов наблюдений.

Данные мониторинга позволяют сопоставлять результаты моделирования с фактическими значениями. Величина расхождения между модельными результатами и натурными наблюдениями зависит как от погрешности расчетов с использованием модели, так и от достоверности исходной информации о геологической среде [6]. Очевидно, чем больше исходной информации и чем более она представительна, тем точнее возможно воспроизвести природно-техногенные условия на математической модели и, следовательно, увеличить объективность прогнозных расчетов.

Для оценки надежности прогнозов и, при определенных условиях, их точности целесообразно использовать результаты статистической обработки исходных данных для обоснования модели. Естественный «разброс» исходных данных – характеристик геологической среды, используемых для обоснования модели и прогнозирования, обуславливает разброс результатов прогнозных расчетов. Очевидно, что параметры статистических распределений характеристик геологической среды могут быть применимы для определения вероятностей реализации прогнозов, получаемых при проведении моделирования и геомиграционных расчетов [7]. Исследования проблем прогнозирования в этом направлении должны быть продолжены.

ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ ОТХОДОВ

Более чем 50-летний опыт эксплуатации трех пунктов захоронения жидких радиоактивных отходов позволяет сопоставить ранее выполненные прогнозныe расчеты с фактическими данными о распределении отходов в горизонтах, используемых для захоронения. Для пунктов захоронения в Северске и Железногорске площади распространения компонентов отходов оказались меньше прогнозных, рассчитанных при проектировании, несмотря на то, что суммарная толщина (мощность) заполняемых отходами слоев оказалась существенно меньше принятой по данным геологоразведочных работ, как следствие вертикальной фильтрационной неоднородности. Это объясняется большими, чем предполагалось, значениями активной пористости и интенсивной задержкой компонентов отходов породами в результате сорбционных и диффузионных процессов. Удовлетворительное соотношение прогнозных и фактических данных дает основание полагать, что прогнозы распространения отходов после прекращения захоронения будут достоверными, так как для их получения использовались практически те же модели и параметры, что и для краткосрочного моделирования.

На рис. 1а приведено сопоставление прогнозных расчетов и данных мониторинга распространения нитратов (стабильного индикатора отходов) в I эксплуатационном горизонте пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в Железногорске (глубины залегания в центральной части 355–500 м). Прогнозный расчет, представленный П.П. Костиным в его диссертационной работе [6], иллюстрирует результаты моделирования методом ЭГДА. Площадь распространения отходов по данным прогнозов при проектировании значимо больше фактической, что свидетельствует о значительном «запасе надежности прогнозов» ввиду отсутствия детальных сведений о характеристиках геологической среды и гидрогеологической обстановке области прогнозирования.

Сравнение результатов эпигнозного моделирования в программных комплексах PMWIN [8], выполненного сотрудниками АО «ВНИПИПромтехнологии» в 2009 г., и сотрудниками ИБРАЭ РАН с использованием созданного ими комплекса ГЕОПОЛИС в 2015 г., с данными мониторинга (рис. 1б), показывает лучшее совпадение результатов моделирования и фактических данных, что обусловлено использованием при моделировании параметров геологической среды, уточненных на начальных этапах эксплуатации пункта захоронения.

Современные программные комплексы позволяют учитывать сорбционные свойства вмещающих пород и скорость радиоактивного распада изотопов. Это дает возможность рассматривать отдельно миграцию нейтральных и радиоактивных компонентов отходов, что

ФИЛОСОФИЯ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ: ПЛЮСЫ И МИНУСЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

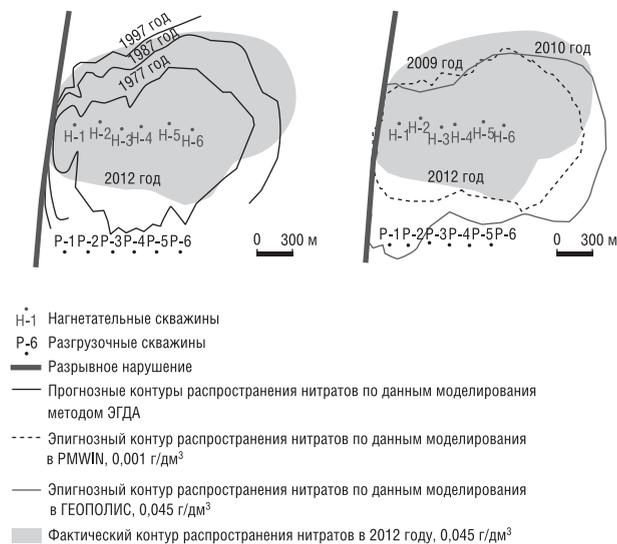


Рис. 1.

Схема контуров распространения нитратов по результатам прогнозных расчетов и данных мониторинга: а) моделирование методом ЭГДА, б) моделирование с использованием комплексов PMWIN и ГЕОПОЛИС

немаловажно для получения достоверных прогнозов скорости движения и концентрации радиоактивных элементов, а, следовательно, и принятия управляющих решений по режиму эксплуатации пунктов захоронения и их мониторингу.

На рис. 2 представлен пример прогнозных расчетов распространения одного из радиоактивных компонентов отходов – стронция-90 с периодом полураспада 30 лет – с учетом сорбционной задержки миграции и без учета на срок 600 лет, а также стабильного индикатора отходов – нитратов – для периода времени 1050 лет после окончания захоронения. Нитраты в I горизонте, залегающем в краевых частях контуров на глубинах 150 и 270 м, к 3000 г. достигают долин рек в концентрациях 0,0003 г/л, что более чем на порядок меньше предельно допустимой концентрации нитратов в подземных водах питьевого качества.

В то же время по данным контрольных наблюдений на пункте захоронения в Димитровграде фактическая картина распространения отходов существенно отличается от прогнозной: площадь фактического контура в несколько раз больше расчетного вследствие проявления вертикальной фильтрационной неоднородности и заполнения отходами отдельных проницаемых зон повышенной проводимости.

В результате в процессе эксплуатации пришлось пересматривать границы области локализации отходов – горного отвода недр. Однако это обстоятельство не снизит уровень безопасности захоронения ввиду надежной изоляции коллекторского горизонта от поверхности и пресных подземных вод мощными толщами практически непроницаемых горизонтов и

М.К. ШАРАПУТА, Н.В. ЧУЛКОВ
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ
ОТХОДОВ И НЕРАДИОАКТИВНЫХ ПРОМСТОКОВ
В ГЛУБОКИЕ ГОРИЗОНТЫ

не создаст сложностей для долгосрочного прогнозирования ввиду низких скоростей естественного движения подземных вод гидродинамической зоны застойного режима.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ

При прогнозировании последствий захоронения жидких радиоактивных отходов и промстоков приходится рассматривать периоды времени в сотни и тысячи лет, в связи с чем возникает закономерный вопрос: будут ли сохраняться в течение этих периодов времени строение и свойства геологической среды, в области которой будет происходить миграция отходов, не произойдут ли изменения, которые приведут к ускорению миграции или снизят естественные изолирующие свойства геологической среды. Для ответа на этот вопрос следует использовать подход, основанный на известном в геологии принципе актуализма, в соответствии с которым геологические процессы в прошлом следует рассматривать аналогичными протекающим в настоящее время. Однако в нашем случае

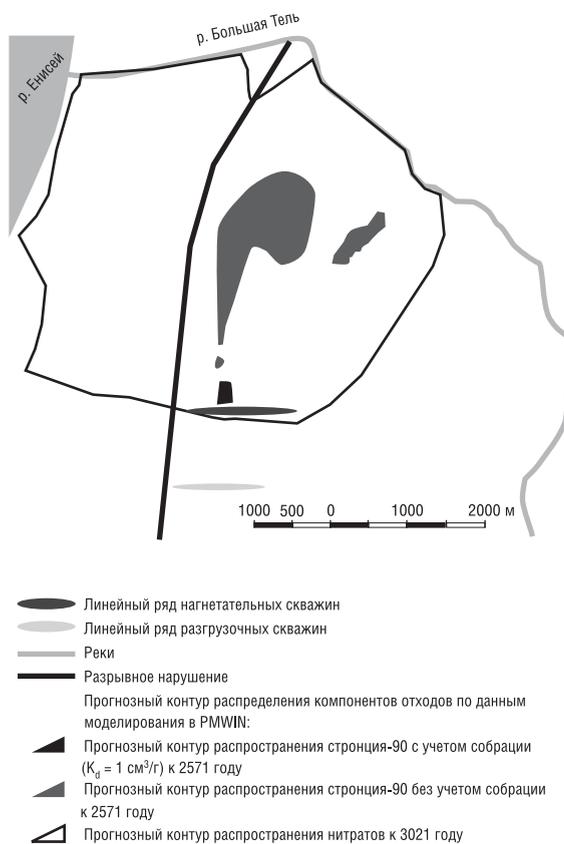


Рис. 2.

Схема контуров распространения компонентов отходов по результатам прогнозных расчетов в программном комплексе PMWIN

принцип актуализма получает дальнейшее развитие: следует полагать, что изменения геологической среды в течение прогнозируемого периода времени будут такие же, какие происходили в прошлом в течение предшествующего периода времени, близкого по длительности к прогнозируемому.

Дальнейшая задача развития методов прогнозирования захоронения жидких радиоактивных отходов – прогнозное моделирование процессов в геологической среде после консервации и закрытия пунктов глубинного захоронения для длительных периодов времени. В постэксплуатационный период отходы должны быть локализованы в пределах горного отвода недр в течение устанавливаемого проектом периода времени. Результаты прогнозов должны быть использованы при корректировке границ горного отвода недр в постэксплуатационный период, обосновании дополнительных мероприятий по локализации отходов в установленных границах, для доказательства достаточности и эффективности проектных решений по консервации и закрытию пунктов захоронения, что требуется при проведении экспертиз различного уровня и получении соответствующих согласований и утверждений проектной документации.

Для решения подобных задач требуется развитие и пополнение баз данных по геолого-гидрогеологическим условиям захоронения жидких радиоактивных отходов на основании мониторинга эксплуатации пунктов захоронения и проведения дополнительных исследований на основе буровых, гидрогеологических и геофизических работ, совершенствование и создания специализированных вычислительных программ. Подобные работы необходимо выполнить в ближайшее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для выполнения достоверных гидрогеологических прогнозов последствий захоронения жидких отходов, прежде всего, необходимо иметь полную исходную информацию о геологическом строении, гидрогеологических условиях объекта и режиме эксплуатации. Информация о строении рассматриваемой толщи горных пород, свойствах пластовых жидкостей, возможной области миграции компонентов отходов, фильтрационных и физико-химических процессах, происходящих при миграции, должна быть получена при проведении предварительных исследований и опытных работах на начальной стадии эксплуатации, дополняться в течение всей работы объектов. Методы исследования процессов миграции путем математического моделирования с применением различных вычислительных программ – это немаловажный этап гидрогеологического прогнозирования, однако, его значение может сводиться к минимуму при неверных представлениях о существующей геологической ситуации в районе объектов захоронения отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **БОРЕВСКАЯ В.А., ГАВРИЛОВ И.Т., ГОЛЬДБЕРГ В.М. и др.** Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие водоносные горизонты. М.: Недра, 1976. 310 с.
2. **БОЧЕВЕР Ф.М., ГАРМОНОВ И.В., ЛЕБЕДЕВ А.В.** Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1965. 306 с.
3. **ВЕРИГИН Н.Н., ВАСИЛЬЕВ С.В., САРКИСЯН В.С. и др.** Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. М.: Недра, 1977. 271 с.
4. Гидрогеологическое прогнозирование. Под ред. Андерсона М.Г, Берта Т.П. М.: Мир, 1988. 736 с.
5. **ГУСЕЙХАНОВ М.К., РАДЖАБОВ О.Р.** Концепции современного естествознания: Учебник. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2007. 540 с.
6. **КОСТИН П.П.** Гидрогеологические основы проектирования и эксплуатации подземных хранилищ жидких радиоактивных отходов // Дисс. док. техн. наук. М., 1987. 378 с.
7. **РЫБАЛЬЧЕНКО А.И., ПИМЕНОВ М.К., КОСТИН П.П. и др.** Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. С. 140–142.
8. **ВРЕДЕНОЕФТ J.** The conceptualization model problem – surprise // Hydrogeology J., 2005. Vol. 13, N 1. P. 37–46.

Шарапута Мария Константиновна, младший научный сотрудник Комплексной научно-исследовательской лаборатории глубинного захоронения жидких радиоактивных и промышленных отходов АО «Ведущий проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

✉ e-mail: Sharaputa.M.K@vnipt.ru

Чулков Николай Валерьевич, младший научный сотрудник Комплексной научно-исследовательской лаборатории глубинного захоронения жидких радиоактивных и промышленных отходов АО «Ведущий проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

✉ 115409 Москва, Каширское ш. д. 33,
e-mail: Chulkov.N.V@vnipt.ru