

УДК 004.942

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/34

А.Д. ИСТОМИН¹, А.Г. КЕСЛЕР¹, О.Н. КОКОРЕВ^{1,2}, М.Д. НОСКОВ¹, А.А. ЧЕГЛОКОВ¹

СИСТЕМА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛИГОНОМ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Представлено описание специализированной компьютерной системы информационного обеспечения управления полигоном глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. Система состоит из геоинформационного, технологического информационного, геотехнологического моделирующего и экспертно-аналитического модулей. Рассмотрено применение системы информационного обеспечения для повышения безопасности эксплуатации полигона глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов.

Ключевые слова: информационные системы, математическое моделирование, экологическая безопасность, жидкие радиоактивные отходы, глубинное захоронение.

Введение

Инновационно-технологическое развитие предприятий атомной отрасли предусматривает информатизацию производства и внедрение интеллектуальных методов управления технологическими процессами. Особенно эффективно применение цифровой трансформации управления для действующих длительное время распределенных и сложных технологических объектов, характеризующихся высоким уровнем неопределенности информации и большим количеством потоков контекстно-зависимых данных. Именно такими чертами обладает полигон глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ПГЗ ЖРО) [1]. Для обеспечения эффективности управления ПГЗ ЖРО необходимо обрабатывать значительные количества геологических и технологических данных, а также прогнозировать изменение состояния пласта-коллектора ЖРО. Разнородность данных о состоянии и истории эксплуатации полигона, а также значительные объемы информации являются причиной низкой оперативности работы, сложности анализа и затруднения принятия оптимальных управленческих решений. Для прогнозирования миграции радионуклидов в подземных водах и изменения состояния пласта-коллектора ЖРО необходимо использовать адекватные математические модели физико-химических, гидродинамических и термодинамических процессов, происходящих в системе ЖРО – пластовые воды – вмещающая порода [2–4]. Применение информационных и моделирующих систем позволяет повысить эффективность управленческих решений. В работе рассматривается специализированная система информационного обеспечения управления пунктом глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (СИОУ ПГЗ ЖРО).

Описание СИОУ ПГЗ ЖРО

СИОУ ПГЗ ЖРО включает в себя четыре взаимосвязанных модуля: геоинформационный (ГИМ), технологический информационный (ТИМ), геотехнологический моделирующий (ГТММ) и экспертно-аналитический (ЭАМ).

Геоинформационный модуль (ГИМ) предназначен для сбора, хранения, обработки и интерпретации данных о геологической среде, а также создания трехмерной геологической и гидрогеологической модели пласта-коллектора [5, 6]. Результаты работы ГИМ хранятся в базе геологических данных (БГД). В состав ГИМ входит система управления БГД, блок ввода и интерпретации данных, блок построения геолого-гидрогеологических разрезов и блок создания геолого-математических гидрогеологических моделей (рис. 1).

Блок ввода и интерпретации данных предназначен для ввода первичной информации по скважинам и результатов ее интерпретации. Первичная информация формируется при сооружении наблюдательных и нагнетательных скважин и содержит описание керна, исследования проб керна, данные геофизических исследований (ГИС) (термокаротажа, гамма-каротажа, спектрометрического гамма-каротажа, резистивиметрии, видеокаротажа и др.) и конструкции (параметры обсадки, цементации, посадки фильтра и т.д.). Исходные информация и результаты ее интерпретации заносятся в БГД с привязкой к технологическому объекту. На основе этих данных модуль автоматически формирует геотехнологическую колонку по скважине в заданном формате.

Блок построения геологических разрезов предназначен для увязки данных по соседним скважинам. Разрезы строятся на основе данных, внесенных в БГД с помощью блока ввода и их интерпретации. При построении определяется список выносимых на разрез скважин и задается ломаная линия профиля, вдоль которой строится разрез. Далее проводится пространственная увязка данных по скважинам путем их выноса на вертикальные профили с последующим соединением участков сходных литологических разностей. Выделяются границы гидрогеологических комплексов, водоносных горизонтов и водоупоров. Параллельно проверяется адекватность интерпретации геофизической, геологической, гидрогеологической и литологической информации по скважинам.

Блок построения геолого-математических гидрогеологических моделей предназначен для создания 3D-цифровых моделей геологической среды на основе информации БГД. При создании 3D-модели в соответствии с гидрогеологическим строением и региональным потоком подземных вод выделяется область моделирования, которая может включать в себя подобласти с различной детализацией в зависимости от решаемых задач и размеров пространственной неоднородности. При дискретизации области моделирования учитываются положения скважин, границ областей и пропластков. Далее интерполяционными или геостатистическими методами строятся дискретные распределения физических величин на адаптивной нерегулярной сетке. Для оценки достоверности полученных распределений проводится кросс-валидация и рассчитываются статистические параметры.

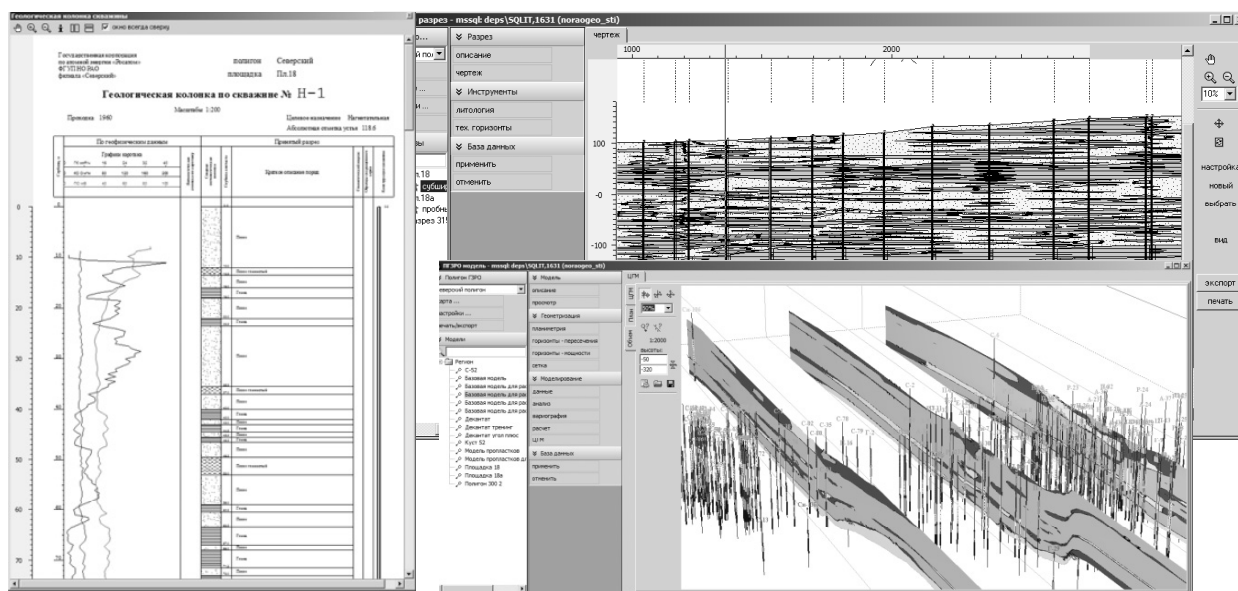


Рис. 1. Примеры рабочих окон блоков ГИМ

Технологический информационный модуль (ТИМ) предназначен для создания цифровой модели наземного комплекса ПГЗ ЖРО. Модуль позволяет осуществлять сбор, хранение, представление и анализ разнородных данных по работе наземного комплекса ПГЗ ЖРО. Результаты работы ТИМ хранятся в базе технологических данных (БТД).

С помощью ТИМ вводятся данные по техническим объектам ПГЗ ЖРО, результатам анализа проб, устанавливаются связи между объектами, выполняется проверка на непротиворечивость введенных данных и установленных связей (рис. 2). В результате создается цифровая модель наземного комплекса ПГЗ ЖРО. В модели содержится технологическая цепочка наземного комплекса и заданы контрольные точки, в которых производятся замеры значений (отборы проб) технологических данных. Модель определяет движение растворов различного типа по трубопроводам в технологической цепочке наземного комплекса. В процессе эксплуатации полигона модель регулярно пополняется и актуализируется.

Модуль состоит из шести блоков. Блок ввода и редактирования технологической схемы предназначен для создания цифровых двойников технологических объектов с пространственной и временной привязкой данных. Для построения технологической схемы между объектами задаются направленные бинарные связи с определением временного интервала их существования. Интел-

лектуальная система на основе анализа всех связей на данный временной интервал строит схему движения растворов и выявляет логические ошибки.

Блок ввода данных химических анализов предназначен для ввода результатов физико-химических анализов с привязкой к технологическому объекту, на котором была отобрана проба и с указанием даты забора, обеспечения контроля работы лаборатории, анализа полученных результатов и редактирования исходных данных.

Блок ввода данных контроля движения растворов предназначен для сбора данных о работе технологических скважин и трубопроводов наземного комплекса. Блок позволяет вводить данные замеров гидродинамических параметров (расходов, дебетов, уровня пластовых вод) с привязкой к контрольной точке, а также указывать временные интервалы остановки работы объекта и вызвавшие ее причины.

Блок ввода информации об удаляемых ЖРО предназначен для внесения в ТИС данных о выполненных операциях нагнетания растворов в подземный пласт-коллектор. Отдельный этап нагнетания ЖРО в подземный пласт-коллектор, как правило, состоит из последовательной закачки растворов нескольких типов (продуктов). Для каждого этапа указывается произвольная последовательность закачиваемых продуктов. Для каждого продукта указывается объем прокаченных растворов и значения контролируемых параметров (свои для каждого типа растворов). Производится увязка результатов исследования проб с закачиваемым продуктом.

Блок ввода и анализа данных ГИС скважин предназначен для внесения соответствующих данных в ТИС. Для выбранной скважины блок позволяет: импортировать из LAS-файлов первичные данные ГИС; визуализировать имеющиеся каротажные кривые в виде таблиц и графиков; сохранять первичные данные в базе технологических данных; при наличии информации о скважине в базе геологических данных предприятия автоматически формировать геологическую колонку.

Блок согласования информации с БГД позволяет, на основе сопоставления ключевых полей в таблицах для одного и того же объекта, осуществлять сопряжение массивов данных геологической и технологической баз данных.

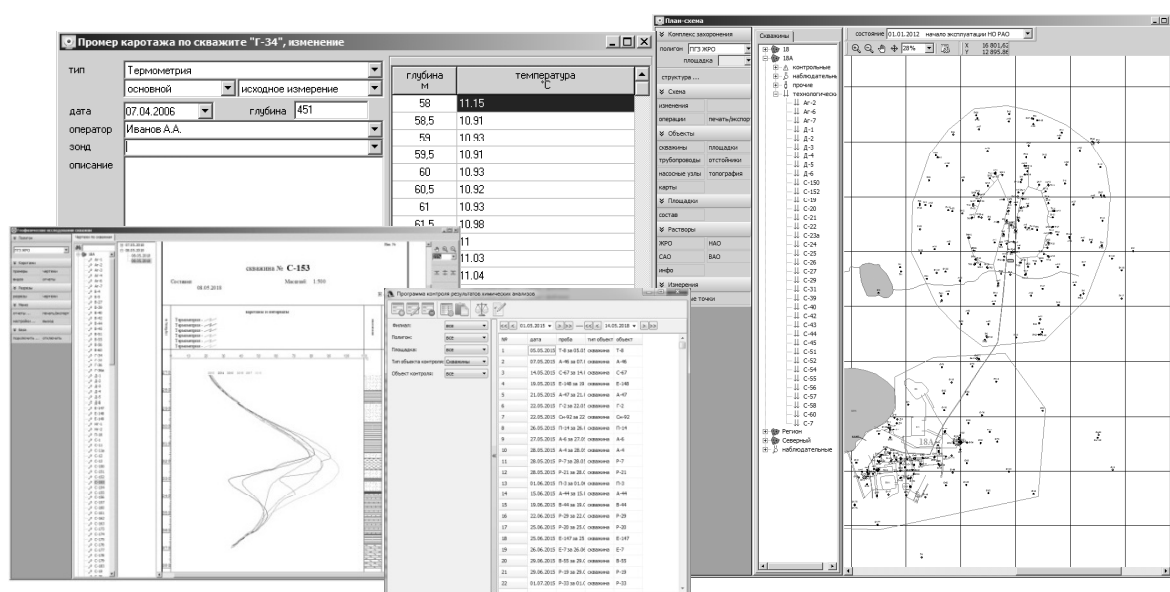


Рис. 2. Рабочие окна ТИМ

Геотехнологический моделирующий модуль (ГТММ) предназначен для создания геотехнологических моделей ПГЗ ЖРО и проведения математического моделирования физико-химических процессов, происходящих в пласте-коллекторе при глубинном захоронении ЖРО (рис. 3). Геотехнологическая модель включает в себя сопряженные геолого-гидрогеологическую, технологическую и физико-химическую модели пластов-коллекторов.

В геолого-гидрогеологическую модель пласта-коллектора входят 3D-распределения литологических, минералогических и гидрогеологических характеристик подземных водоносных пластов. Технологическая модель включает в себя расположение нагнетательных и наблюдательных скважин, режимы работы нагнетательных скважин и составы удаляемых растворов. Физико-

химическая модель имеет набор параметров, необходимых для моделирования физико-химических процессов.

Моделирование эволюции состояния пласта-коллектора производится на основе численной реализации математической модели физико-химических процессов, происходящих в системе вмещающая порода – пластовые воды – ЖРО [7, 8]. Модель описывает распределение давления, кондуктивный теплообмен, конвективный тепло- и массоперенос, гидродинамическую дисперсию, растворение-осаждение минералов, сорбцию радионуклидов, соосаждение радионуклидов с вновь образованными минералами, комплексообразование, ассоциацию-диссоциацию кислот, гомогенные и гетерогенные окислительно-восстановительные процессы, радиоактивный распад, энерговыделение, радиационно-химическое и термохимическое разложение кислот. В результате работы модуля получаются пространственные распределения концентраций компонентов в технологических растворах и подземных водах, температуры, радиационных полей, содержания радионуклидов в породе и других параметров, характеризующих состояние пласта-коллектора.

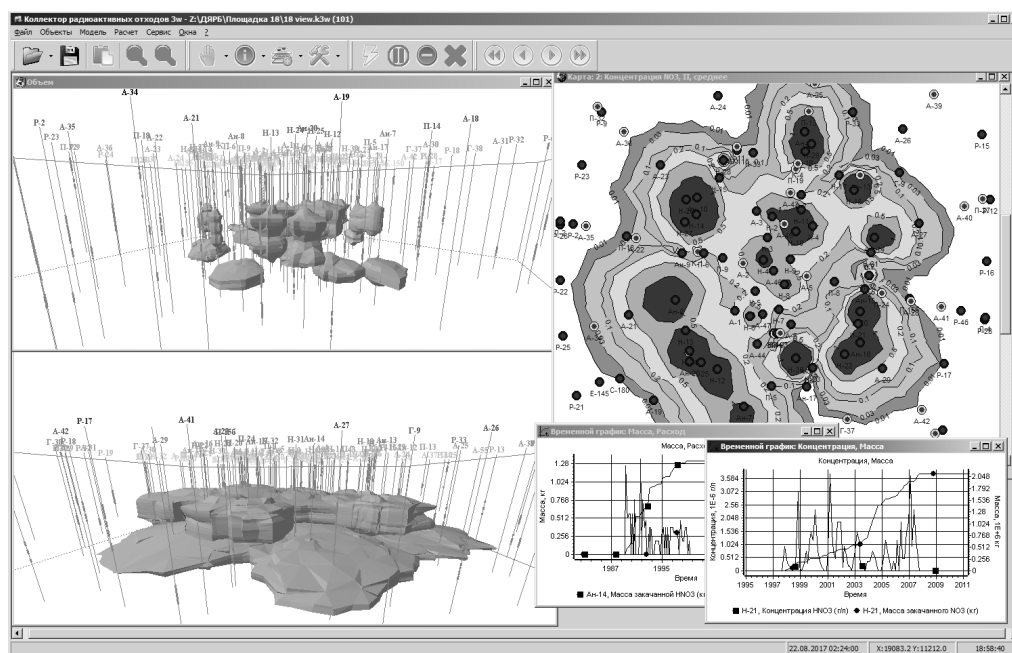


Рис 3. Результаты моделирования работы ПГЗ ЖРО с помощью ГТММ

Экспертно-аналитический модуль (ЭАМ) предназначен для выполнения оценки состояния пласта-коллектора и поддержки принятия управленческих решений (рис. 4). Его работа основана на результатах работы ГИМ, ТИМ и ГТММ. Результаты работы ЭАМ хранятся в БТД. Модуль позволяет просматривать в интерактивном режиме весь объем данных, необходимых для описания состояния пласта-коллектора ПГЗ ЖРО. С помощью ЭАМ можно проводить анализ показателей работы технологических объектов, временных зависимостей, характеризующих состояние полигона и работу скважин, визуализировать распределения физических величин в выделенных водоносных горизонтах, а также вдоль вертикальных и латеральных сечений и др.

Методика эксплуатации СИОУ ПГЗ ЖРО

СИОУ применяется для сбора, обработки и хранения актуальных геологических и технологических данных, эпигнозного и прогнозного моделирования состояния пласта-коллектора, экспертной оценки и анализа данных о работе ПГЗ ЖРО. В задачу системы также входит осуществление информационной поддержки принятия управленческих решений. На первом этапе с помощью ГИМ создаются 3D-геологическая и гидрогеологическая модели пласта-коллектора. В БГД вносятся первичные данные, полученные при сооружении скважин, проведении на них геофизических работ, описании керна и т.д. На основе внесенных данных создаются геологические колонки по скважинам. По геологическим колонкам строятся разрезы пластов-коллекторов с отображением распределений геологических и геотехнологических параметров (состава и возраста пород, технологических горизонтов и др.). На основе согласованных первичных данных и результатов интер-

претации создается 3D-сопряженная гидрогеологическая модель осадочной толщи, содержащая полигон глубинного захоронения. При построении модели задаются границы области моделирования, выделяются плановые подобласти, требующие большей детализации описания. Далее литологическая осадочная толща на исследуемом участке разбивается на горизонтальные стратифицированные слои. Детальность и критерии выделения горизонтальных слоев определяются с поставленной задачей. В области моделирования в соответствии с выделенными подобластями и разбиением на слои генерируется адаптированная расчетная сетка. На основе имеющихся в БГД данных строятся распределения физических величин различными интерполяционными или геостатистическими методами.

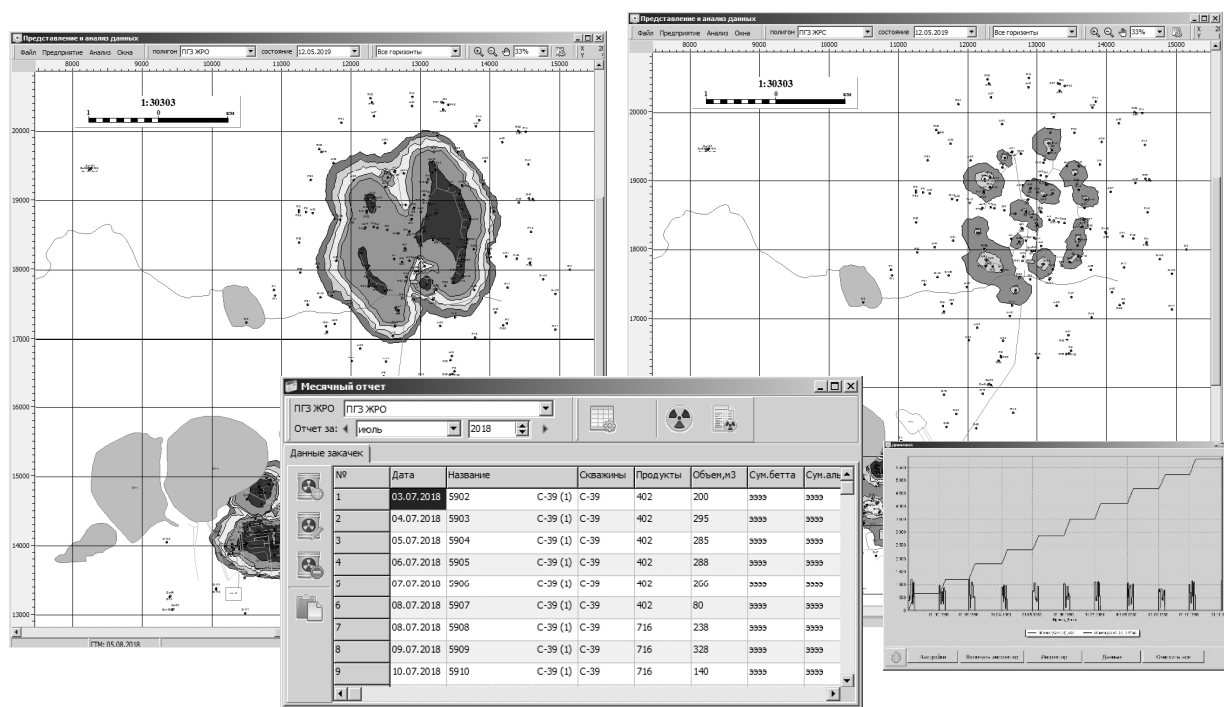


Рис. 4. Рабочие окна ЭАМ

На втором этапе с помощью ТИМ создается цифровая модель наземного комплекса ПГЗ ЖРО. Вводятся данные по техническим объектам полигона – нагнетательным и наблюдательным скважинам, трубопроводам и другим наземным объектам. Вносятся данные по объемам и составам удаляемых растворов, режимам работы скважин. Между объектами устанавливаются связи и выполняется проверка на их непротиворечивость. На основе непротиворечивых первичных данных формируются согласованные режимы работы скважин. В результате создается цифровая модель наземного комплекса полигона глубинного захоронения. В модели содержится технологическая цепочка такого комплекса, определены принадлежности скважин к площадкам, заданы контрольные точки, в которых производятся замеры значений (отборы проб) технологических данных. Модель определяет движение растворов различного типа по трубопроводам в технологической цепочке наземного комплекса. В процессе эксплуатации полигона модель регулярно пополняется и актуализируется.

На третьем этапе с помощью ГТММ проводится 3D-моделирование миграции радионуклидов и динамики теплового поля в пласте-коллекторе при глубинном захоронении ЖРО. Моделирование выполняется на основе геотехнологической модели ПГЗ ЖРО. Параметры моделирования физико-химических процессов определяются на основе литературных данных, по результатам лабораторных опытов, а также на основе результатов наблюдений за состоянием полигона.

На последнем этапе с помощью ЭАМ выполняется оценка геоэкологического состояния пласта-коллектора. Работа ЭАМ основана на результатах работы геоинформационного, технологического информационного и геотехнологического модулей. По результатам работы СИОУ ПГЗ ЖРО вырабатываются управленческие решения для повышения безопасности и эффективности эксплуатации ПГЗ.

Заключение

СИОУ ПГЗ ЖРО позволяет производить сбор, обработку и хранение разнородных геологических и технологических данных, строить геологическую и гидрогеологическую модели пласта-коллектора, создавать цифровую модель технологических объектов наземного комплекса ПГЗ ЖРО, проводить эпигнозное и прогнозное моделирование работы полигона, выполнять анализ большого количества технологических данных. В результате эксплуатации СИОУ создается цифровой двойник ПГЗ ЖРО и формируется цифровой след работы полигона. Применение СИОУ ПГЗ ЖРО позволяет увеличить безопасность глубинного захоронения ЖРО, а также повысить скорость и эффективность принятия управленческих решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. – М.: ИздАТ, 1994.
2. Зубков А.А., Рыбальченко А.И., Токарев И.В. и др. // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 11. – С. 56–61.
3. Захарова Е.В., Каймин Е.П., Дарская Е.Н. и др. // Радиохимия. – 2001. – Т. 43. – № 4. – С. 378–380.
4. Alexandrova L.N., Glinsky M.L., Danilov V.V., et al. // Injection Science and Technology, Berkeley, California, 22–25 October 2003. – Berkeley, 2003. – P. 46–53.
5. Данилов В.В., Истомин А.Д., Носков М.Д. // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 329. – С. 256–261.
6. Данилов В.В., Истомин А.Д., Кокорев О.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 12/2. – С. 19–24.
7. Истомин А.Д., Носков М.Д., Кеслер А.Г. и др. // Радиохимия. – 2007. – Т. 49. – № 2.
8. Данилов В.В., Зубков А.А., Носков М.Д., Истомин А.Д. // Геоинформатика. – 2007. – № 4. – С. 36–43.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

¹ Северский технологический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Россия

² Филиал «Северский» ФГУП «НО РАО», г. Северск, Россия

Истомин Андрей Дмитриевич, к.ф.-м.н., доцент СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: Istomin_a.d@mail.ru;

Кеслер Аркадий Григорьевич, к.ф.-м.н., доцент СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: arcanag@mail.ru;

Кокорев Олег Николаевич, аспирант СТИ НИЯУ «МИФИ», геолог филиала «Северский», e-mail: ONKokorev@norao.ru;

Носков Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: MDNoskov@mephi.ru;

Чеглоков Алексей Александрович, науч. сотр. СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: AACheglovkov@mephi.ru.

A.D. ISTOMIN¹, A.G. KESLER¹, O.N. KOKOREV^{1,2}, M.D. NOSKOV¹, A.A. CHEGLOKOV¹

SPECIALIZED INFORMATION SUPPORT SYSTEM FOR THE MANAGEMENT OF A DEEP DISPOSAL SITE FOR LIQUID RADIOACTIVE WASTE

The description of a specialized information support system for the management of a deep disposal site for liquid radioactive waste is presented. The system consists of geo-information, technological information, geotechnological modeling and expert-analytical modules. The application of the information support system to improve the safety of deep disposal site of liquid radioactive waste is considered.

Keywords: *information systems, mathematical modeling, environmental safety, liquid radioactive waste, deep disposal.*

¹ Seversk Technological Institute National Research Nuclear University «MEPHI», Seversk, Russia

² The Federal State Unitary Enterprise «National operator for radioactive waste management» the branch «Severskiy», Seversk, Russia

Istomin Andrey Dmitrievich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor STI NRNU «MEPHI», e-mail: Istomin_a.d@mail.ru;

Kesler Arkadiy Grigorievich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor STI NRNU «MEPHI», e-mail: arcanag@mail.ru;

Kokorev Oleg Nikolaevich, Postgraduate Student STI NRNU «MEPHI», Geologist branch «Severskiy», e-mail: ONKokorev@norao.ru;

Noskov Mikhail Dmitrievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor STI NRNU «MEPHI», e-mail: MDNoskov@mephi.ru;

Cheglovkov Alexey Aleksandrovich, Researcher STI NRNU «MEPHI», e-mail: AACheglovkov@mephi.ru.