

УДК 65.011.56

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/46

О.Н. КОКОРЕВ^{1,2}, Н.Р. АДОНИН¹, М.Д. НОСКОВ¹, Т.Ю. ЗАВЕДИЙ³, А.А. ЩИПКОВ¹

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Рассмотрены основные подходы для построения автоматизированной системы гидродинамического мониторинга пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. Система состоит из модуля автоматизированного сбора данных и информационно-вычислительного модуля компенсации возмущений гидросферы. Описаны архитектура системы, функциональная структура программного обеспечения, методология выявления изменения уровня подземных вод вследствие техногенных воздействий.

Ключевые слова: гидродинамический мониторинг, пункт глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов, автоматизированная система, компенсация природных возмущений гидросферы, экологическая безопасность.

Введение

Гидродинамический мониторинг (ГМ) является одним из основных способов оценки экологической безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ПГЗ ЖРО) [1]. Он представляет собой систему наблюдений за изменением уровней подземных вод с последующей обработкой результатов измерений. Оценка безопасности основана на сопоставлении текущих параметров нагнетания ЖРО в эксплуатационные горизонты (объем, расход, давление, приемистость и т.п.) с динамикой уровней подземных вод в эксплуатационных, буферных и вышележащих горизонтах. Это позволяет выявлять перетоки между горизонтами, вызванные техногенными факторами. Своевременное обнаружение таких перетоков при соответствующей реакции эксплуатационного персонала минимизирует последствия нештатных ситуаций, основную опасность среди которых представляют перетоки по затрубному пространству нагнетательной скважины, межгоризонтные перетоки, потеря герметичности эксплуатационной колонны нагнетательных скважин. В этой связи является актуальным создание автоматизированной системы ГМ, работающей в режиме реального времени [2]. В настоящее время разработан целый ряд автоматизированных систем для сбора данных от объектов, расположенных на значительных площадях [3–5]. Подобные системы используются для мониторинга окружающей среды, радиационной обстановки, различных геолого-технологических параметров и т.п. В отличие от существующих систем, при автоматизации гидродинамического мониторинга ПГЗ ЖРО необходимо учитывать ряд особенностей, оказывающих влияние на архитектуру системы, функциональную структуру программного обеспечения и методику обработки данных. К таким особенностям можно отнести: размещение технологических объектов на значительной площади; отсутствие централизованного электроснабжения ряда наблюдательных скважин ввиду их удаленности; невозможность реализовать проводные каналы связи для передачи технологических данных от удаленных наблюдательных скважин; зависимость состояния подземной гидросферы от вариаций атмосферного давления, изменений нагрузки под весом осадков, лунно-солнечных приливных вариаций; необходимость учета смещения эксплуатационной колонны наблюдательных скважин. В данной работе рассмотрены основные технические решения и методологические подходы для построения автоматизированной системы ГМ ПГЗ ЖРО, разрабатываемой с целью наиболее раннего выявления перетоков между подземными водоносными горизонтами.

Архитектура и функциональная структура программного обеспечения системы ГМ

Автоматизированная система ГМ представляет собой аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий сбор, обработку и хранение данных, необходимых для оценки гидродинамической обстановки в районе ПГЗ и контроля основных параметров технологического процесса, а также взаимодействие с пользователями.

Архитектура системы ГМ характеризуется наличием различных каналов связи: волоконно-оптического канала (ВОК), электропроводного канала, GSM-канала (рис. 1). Это связано с отличиями

ем условий передачи сигналов от комплекса измерительных средств, расположенных внутри технологического здания, где находятся насосное оборудование и запорная арматура, и от измерительной аппаратуры нагнетательных и наблюдательных скважин, рассредоточенных на полигоне.

Аппаратная часть автоматизированной системы ГМ состоит из:

- контрольно-измерительных приборов (КИП), установленных на технологическом оборудовании и формирующих сигналы о параметрах технологического процесса;
- автоматизированной стационарной метеостанции, регистрирующей изменение погодных факторов, влияющих на уровень подземных вод;
- технических средств, обеспечивающих работу каналов передачи данных и линий связи, по которым эта передача осуществляется (медиаконвертеры, GSM-передатчики и приемники, коммутатор);
- программируемого логического контроллера (ПЛК), отвечающего за режим сбора и передачи данных;
- сервера приложений и баз данных (БД), обеспечивающего работу программной части системы и хранение данных;
- автоматизированных рабочих мест (АРМ) специалистов ПГЗ ЖРО, являющихся пользователями системы.

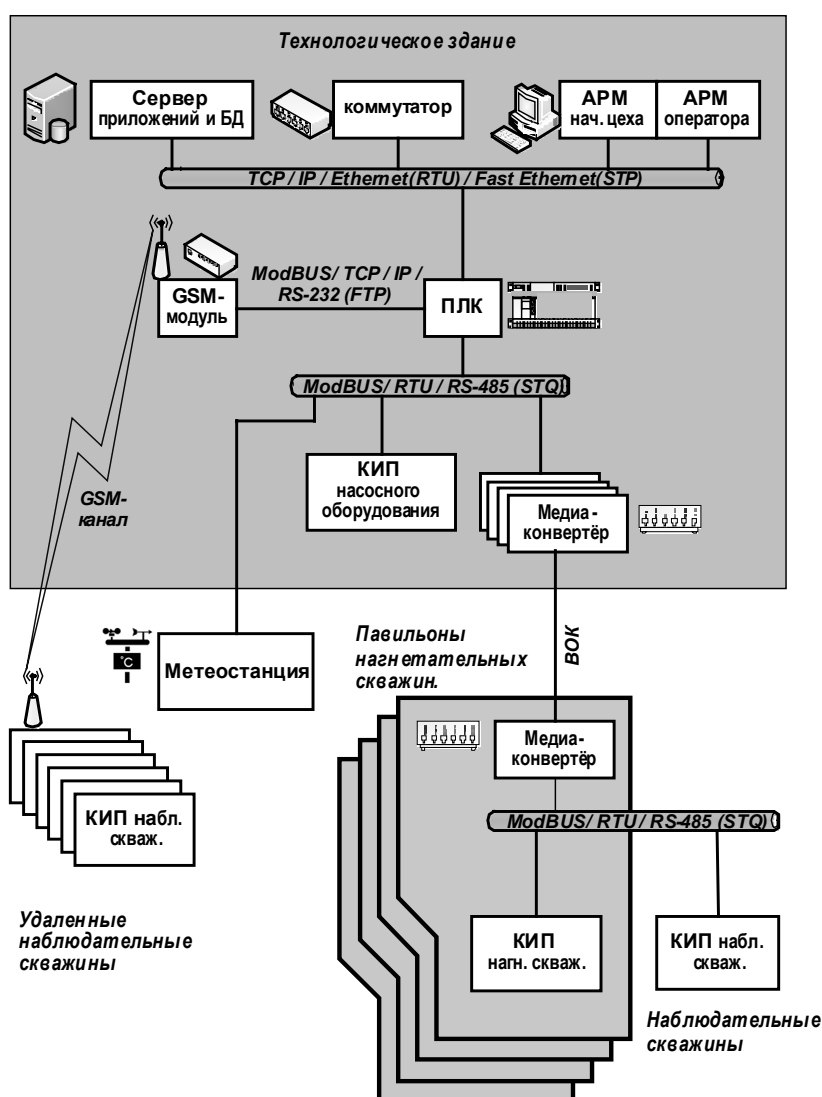


Рис. 1. Архитектура автоматизированной системы ГМ ПГЗ ЖРО

При каждом павильоне нагнетательных скважин сформирована шина RS-485, куда поступают данные от измерительных приборов, установленных в самом павильоне и на близлежащих наблюдательных скважинах. Данные с шины каждого павильона преобразуются в оптический сигнал с

помощью медиаконвертеров RS-485 – BOK и передаются по волоконно-оптическому кабелю в технологическое здание, где преобразуются медиаконвертерами BOK – RS-485 обратно в электрический сигнал. Таким образом, все линии волоконно-оптической связи между павильонами нагнетательных скважин и технологическим зданием построены по топологии «точка-точка». Медиаконвертеры BOK – RS-485 присоединены к шине RS-485 технологического здания. Через эту же шину передаются данные от КИП насосного оборудования, расположенного в технологическом здании, и метеоданные от стационарной метеостанции. Данные от удаленных наблюдательных скважин передаются по GSM-каналу на GSM-модуль, который расположен в технологическом здании. Центральным узлом сбора данных системы ГМ является программируемый логический контроллер (ПЛК), который является ведущим устройством шины RS-485 технологического здания, а также шины RS-232 (по которой получает данные от GSM-модуля). Используемая в архитектуре автоматизированной системы ГМ комбинированная топология позволяет обеспечить надежную передачу данных и слабую созависимость сетевых каналов. Обработка данных производится с помощью программного обеспечения системы, установленного на сервере приложений и баз данных. Сервер связан с ПЛК по сети Ethernet, куда также входят автоматизированные рабочие места (АРМ), через которые осуществляется взаимодействие пользователей с автоматизированной системой ГМ.

Программная часть автоматизированной системы ГМ имеет модульную структуру и состоит из модуля сбора данных, модуля компенсации возмущений гидросферы и базы данных (рис. 2). Согласованная работа модулей позволяет реализовать гидродинамический мониторинг в режиме реального времени.

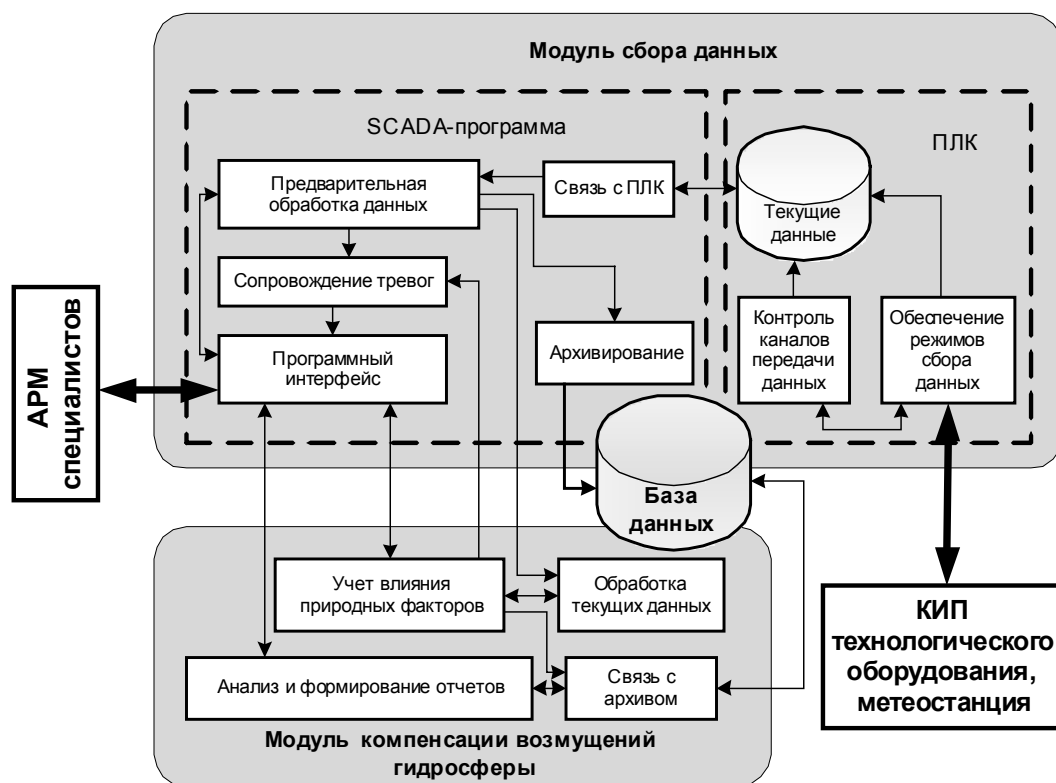


Рис. 2 Функциональная структура программного обеспечения автоматизированной системы ГМ ПГЗ ЖРО

Модуль сбора данных состоит из программного обеспечения ПЛК и SCADA-программы, размещенной на сервере приложений и БД. Программное обеспечение ПЛК реализует сбор данных с КИП технологических объектов, предварительную обработку, структуризацию и буферное хранение значений технологических параметров и метеоданных, обеспечивает заданный режим сбора данных, формирует сигналы о состоянии каналов связи и комплекса измерительных средств. SCADA-программа в реальном времени обеспечивает отображение значений параметров технологического процесса на мониторах АРМ специалистов, контроль нахождения параметров в допус-

тимых интервалах, формирование сигналов тревог и ведение журнала тревог, наполнение базы данных.

Основная задача программного модуля компенсации возмущений гидросферы – выявление изменения уровня подземных вод в наблюдательных скважинах ПГЗ ЖРО, вызванных перетоками из эксплуатационных горизонтов. Модуль размещается на сервере приложений и БД и реализует методики, позволяющие компенсировать изменения уровня подземных вод в наблюдательных скважинах, возникающие из-за влияния природных факторов и смещения эксплуатационной колонны. Для этого модуль использует технологические и метеоданные, поступающие от модуля сбора данных. Если динамика уровня подземных вод не обусловлена изменениями природных условий, то модуль формирует сигнал о техногенной природе изменения уровня, причиной которого может быть переток между горизонтами. Модуль обеспечивает сохранение полученных результатов в базе данных и организацию работы с архивом. Программный интерфейс модуля встроен в программный интерфейс SCADA-программы, что позволяет специалистам оперативно реагировать на выданную модулем информацию, рассматривая ее в контексте текущих значений технологических параметров. Вся информация, получаемая при работе автоматизированной системы ГМ, хранится в базе данных, работающей под управлением СУБД. Централизованное хранение информации позволяет анализировать работу ПГЗ ЖРО в различные периоды, формировать необходимые отчеты, совершенствовать методику компенсации возмущающих факторов.

Одним из ключевых условий своевременного выявления перетока между горизонтами ПГЗ ЖРО является точность компенсации влияния на уровень подземных вод возмущающих факторов. В следующем разделе рассмотрены основные методологические подходы, реализуемые программным модулем компенсации возмущений гидросферы автоматизированной системы ГМ.

Методика компенсации возмущений гидросферы

Программный модуль компенсации возмущений реализует методики учета влияния следующих природных факторов на уровень подземных вод в наблюдательных скважинах ПГЗ ЖРО [6–8]: атмосферное давление, лунно-солнечные приливные вариации, атмосферные осадки. Кроме того, модуль учитывает смещение эксплуатационной колонны из-за избыточного давления в эксплуатационных горизонтах. Рассмотрим основные подходы для учета этих факторов.

Известно, что естественные вариации атмосферного давления оказывают значительное влияние на уровни подземных вод. В зависимости от глубины залегания контролируемого горизонта колебания давления ± 15 мм рт. ст. будут обуславливать приращения уровня в контрольных скважинах с амплитудой до нескольких сантиметров. Для учета этого фактора производится синхронная регистрация атмосферного давления и коррекция измеренного значения уровня подземных вод по заранее известной линейной зависимости «давление – уровень». Величиной, связывающей приращения уровня подземных вод в скважине с приращениями атмосферного давления, является дифференциальный коэффициент линейной связи B – барометрическая эффективность скважины, мм в. ст./мм рт. ст. Выражение пересчета уровня для компенсации колебаний атмосферного давления имеет вид

$$h^*(t_i) = h(t_i) + (P_0 - P(t_i))B/1000, \quad (1)$$

где $h^*(t_i)$ – пересчитанный уровень подземных вод в скважине в момент времени t_i , м; $h(t_i)$ – измеренный уровень подземных вод в скважине в момент времени t_i , м; P_0 – среднее многолетнее атмосферное давление в месте установки датчика уровня, мм рт. ст.; $P(t_i)$ – измеренное атмосферное давление в момент времени t_i , мм рт. ст.

Амплитуда лунно-солнечных приливных вариаций уровня растет с увеличением глубины. В обычных песчано-глинистых водоносных горизонтах с общей пористостью в 30% на глубине 200 м средняя амплитуда лунно-солнечных вариаций составляет 1–2 мм, а в залегающем ниже палеозойском фундаменте – до 10 мм (при глубине в 370–400 м). Приливные вариации уровня удаляются из замеров с помощью простых расчетных зависимостей, использующих как астрономические константы, так и экспериментально определенные характеристики приливного отклика, индивидуального для каждой скважины.

В умеренных широтах наибольшей амплитуды лунно-солнечные вариации достигают в периоды сизигий (полнолуние или новолуние, через каждые 14.77 сут), в периоды максимума или минимума лунных склонений, когда Луна сильнее всего отходит от небесного экватора в Северное

или Южное небесное полушарие соответственно (через каждые 13.66 сут), а также в период прохождения Луной точки перигея (через каждые 27.55 сут).

Интенсивные осадки на большой площади за счет давления выпавшего дождя или снега создают поверхностную нагрузку, особенно в первые сутки после осадков. На графике (рис. 3) это выглядит как резкое увеличение уровня подземных вод, которое можно спутать с началом перетока, особенно если наблюдательная скважина расположена вблизи нагнетательной. В летнее время за счет испарения поверхностного и подземного стока такая аномалия, возникнув от интенсивных осадков, постепенно уменьшается за 1–2 недели; зимой же – остается практически постоянной до следующего снегопада либо слабо уменьшается или увеличивается за счет явления снегопереноса.

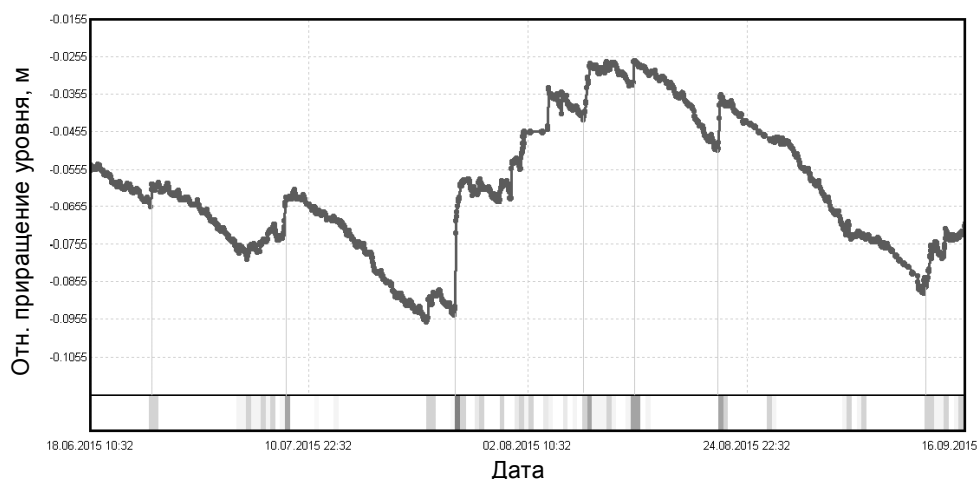


Рис. 3. Пример зависимости уровня подземных вод в буферном горизонте от выпадения осадков в летний период (наиболее интенсивные осадки выделены линиями)

Кроме влияния на гидросферу природных факторов, программное обеспечение модуля компенсации возмущений учитывает техногенный фактор воздействия на точность измерения уровня, связанный со смещением эксплуатационной колонны, на оголовке которой установлен контрольно-измерительный прибор замера уровня. Любое смещение колонны приводит к изменению точки отсчета при замерах уровня. Смещение колонны вверх приводит к ложному падению уровня, а смещение вниз, напротив, – к ложному скачку. Формула, описывающая затухание деформационного смещения колонны наблюдательной скважины δ_P (м) в зависимости от расстояния забоя этой скважины до кровли эксплуатационного горизонта h (м) и расстояния до нагнетательной скважины r (м), может быть представлена в виде

$$\delta_P = K_P \cdot \exp \left(-\sqrt{\left(\frac{h}{h_c}\right)^2 + \left(\frac{r}{r_c}\right)^2} \right) \Delta P, \quad (2)$$

где K_P – дифференциальный коэффициент деформационного смещения, м/атм; r_c – характеристический радиус экспоненциального затухания деформации, м; h_c – характеристическая высота экспоненциального затухания деформации, отсчитываемая от кровли эксплуатационного горизонта, м; ΔP – приращение давления нагнетания в скважине, вызвавшей деформацию, атм.

Кроме перечисленных природных факторов, на состояние гидросферы влияют также сезонное воздействие от ближайшего крупного водотока и сезонная периодичность поступления питания в водоносные горизонты. Однако при разработке программного обеспечения автоматизированной системы ГМ они не учитываются, так как имеют долгопериодические вариации, которые не влияют на выявление резких и небольших скачков уровня подземных вод.

Выводы

На основе анализа особенностей технологического процесса ПГЗ ЖРО разработана архитектура, функциональная структура программного обеспечения и основные методики обработки данных автоматизированной системы ГМ. Предложенные технические решения и методологические подходы позволяют создать систему, работающую в режиме реального времени, которая обеспе-

чивает своевременное выявление изменений уровня подземных вод в наблюдательных скважинах, возникающих вследствие перетока из эксплуатационных горизонтов. Использование такой системы минимизирует потенциальный ущерб для окружающей среды и существенно повысит эффективность и безопасность работы ПГЗ ЖРО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. – М.: ИздАТ, 1994. – 230 с.
2. Гаричев С.Н., Еремин Н.А. Технология управления в режиме реального времени. – М.: МФТИ, 2015. – 196 с.
3. Антоний Е.В., Арутюнян Р.В., Богатов С.А. и др. // Труды ИБРАЭ РАН. – 2013. – Вып. 15. – С. 24–41.
4. Замай В.И., Добровольский Н.С. // ГеоРиск. – 2012. – № 4. – С. 64–68.
5. Киргизов Д.И., Иванов А.А., Шерстюков О.Н. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 2. – С. 55–60.
6. Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М. и др. // Физика Земли. – 2015. – № 1. – С. 73–82.
7. Гумен А.М. // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2000. – № 3. – С. 37–41.
8. Zubkov A.A., Sukhorukov V.A., Zykov A.I., et al. // Developments in Water Science. V. 52. Under-ground Injection Science and Technology / eds. by Chin-Fu Tsang and John A. Apps. – Elsevier, 2005. – P. 151–155.

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

³ АО «Сибирский химический комбинат», г. Северск, Россия

Кокорев Олег Николаевич, аспирант СТИ НИЯУ «МИФИ», геолог филиала «Северский», e-mail: ONKokorev@norao.ru;
Адонин Никита Русланович, аспирант СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: d273ANR@edu.ssti.ru;
Носков Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: MDNoskov@mephi.ru;
Заведий Тарас Юрьевич, к.г.-м.н., инженер СХК, e-mail: taras-zavedy@yandex.ru;
Шчипков Александр Андреевич, к.т.н., доцент СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: AAShchipkov@mephi.ru.

O.N. KOKOREV^{1,2}, N.R. ADONIN¹, M.D. NOSKOV¹, T.Y. ZAVEDY³, A.A. SHCHIPKOV¹

AN AUTOMATED SYSTEM OF HYDRODYNAMIC MONITORING FOR THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF A GEOLOGICAL REPOSITORY OF LRW

The main approaches to creating an automated system for hydrodynamic monitoring a geological repository of liquid radioactive waste have been considered. The system consists of a computer-aided data acquisition module and a computing module for compensating hydrosphere disturbance. The system architecture, the software functional structure and the technique for determining ground water level change due to industrial action have been described.

Keywords: *hydrodynamic monitoring; a geological repository of liquid radioactive waste; computer-aided data acquisition; compensating natural hydrosphere disturbance; environmental safety.*

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

³ Joint-Stock Company «Siberian Chemical Combine», Seversk, Russia

Kokorev Oleg Nikolayevich, Graduate Student STI NRNU «MEPHI», Geologist branch «Seversky», e-mail: ONKokorev@norao.ru;
Adonin Nikita Ruslanovich, Graduate Student STI NRNU «MEPHI», e-mail: d273ANR@edu.ssti.ru;
Noskov Mikhail Dmitriyevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor STI NRNU «MEPHI», e-mail: MDNoskov@mephi.ru;
Zavedy Taras Yurievich, Candidate of Geology, Engineer JSC «Siberian Chemical Combine», e-mail: taras-zavedy@yandex.ru;
Shchipkov Alexander Andreevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor STI NRNU «MEPHI», e-mail: AAShchipkov@mephi.ru.