

АНАТОЛИЙ ИЛЬИЧ КАЛАШНИК

кандидат технических наук, зав. лабораторией, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук (Апатиты, Российская Федерация)
kalashnik@goi.kolasc.net.ru

НАДЕЖДА АНАТОЛЬЕВНА КАЛАШНИК

научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук (Апатиты, Российская Федерация)
nadezhda-kalashnik28@rambler.ru

ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЗАПОРОЖЕЦ

ведущий инженер, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук (Апатиты, Российская Федерация)
Zaporojec@goi.kolasc.net.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ НАСЫПНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ НА МОРЕННОМ ОСНОВАНИИ

Рассмотрены насыпные грунтовые гидротехнические сооружения с точки зрения требований к ответственным объектам. Проведены комплексные георадарные и сейсмотомографические исследования плотины на р. Пиренга, на основании чего построена ее геомеханическая модель и выполнено компьютерное моделирование. Проведенные работы позволили оценить состояние плотины, трассировать депрессионную плоскость и выявить локальные зоны повышенного влагонасыщения и фильтрации. Результаты проведенных исследований представляют собой методологическую и научно-техническую основу для прогнозирования наиболее уязвимых мест (зон) насыпного грунтового гидротехнического сооружения на моренном основании для условий Мурманской области и Северной Карелии.

Ключевые слова: насыпные грунтовые гидротехнические сооружения, плотина, георадар, исследования, компьютерное моделирование, оценка состояния

ВВЕДЕНИЕ

Основные гидротехнические сооружения на территории Кольского полуострова и Карелии представляют собой насыпные грунтовые плотины или дамбы хвостохранилищ, возведенные на естественном основании, представляющем собой моренные отложения. Как правило, такие сооружения являются потенциально опасными объектами, эксплуатация которых должна выполняться в строгом соответствии с требованиями промышленной безопасности (117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [8], СНиП 33–01–2003 «Гидротехнические сооружения» [7]). Нарушение устойчивости и функциональности насыпных грунтовых плотин и ограждающих дамб хвостохранилищ может привести к аварийной ситуации и значительному социально-экономическому ущербу населению, гражданским и промышленным зданиям, дорогам, инженерно-техническим коммуникациям и т. п., а также к финансовым потерям (недополученная прибыль вследствие остановки ГЭС или горно-обогатительной фабрики), дополнительным затратам (ремонтно-восстановительные работы: плотин, дамб, пульпопроводов, дорог, линий электропередачи, пьезометрических станций, устройств и механизмов и др.; ликвидация последствий аварии; восстановление

окружающих природных систем) и штрафам за загрязнение окружающей среды и экологический ущерб [1], [2].

АВАРИИ НАСЫПНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Мировой опыт эксплуатации насыпных грунтовых плотин и дамб имеет многочисленные примеры возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий, наиболее известные из которых: плотины: Боулдерхэд (Великобритания), Фонтенель (США), Курейской ГЭС (РФ); дамбы: Качканарского ГОКа (РФ), рудника Эль-Кобра (Чили), Карамкенского ГМК (РФ), углеобогательной фабрики в Буффало-Крик (США), шахты «Преставель» (Италия), шламохранилища завода «MAL Hungarian Aluminum» в Колонтаре (Венгрия), ОАО «Аммофос» (РФ) и др. [6], [11].

В Мурманской области, которая является крупным горнорудным, металлургическим и энергетическим регионом, имеется более 100 ГТС соответствующего профиля. Анализ их состояния показывает, что системные исследования надежности ГТС Мурманской области до настоящего времени фактически не выполнялись. Вместе с тем опасные и чрезвычайные ситуации,

связанные с эксплуатацией насыпных плотин и дамб, возникали в данном регионе ранее и могут возникнуть в будущем на особо проблемных объектах.

Так, в 1999, 2001 и 2002 годах в результате прорыва дамбы помехохранилища было сброшено около 96 000 т пометного ила на поля, в р. Кола и озера Рогозеро и Большое, из которых осуществляется водозабор питьевой воды для Мурманска [9]. Город был временно отключен от водоснабжения из-за угрозы возникновения эпидемии. Непосредственно в черте города образовались зловонные участки на местности, которые при весеннем снеготаянии до настоящего времени являются источниками экологического загрязнения окружающей природной среды. Нет данных о принятии научно обоснованных инженерных мер по обеспечению безаварийного функционирования помехохранилища и природоохранным мероприятиям, что косвенно может свидетельствовать о возможных повторениях аварий.

В ноябре 2012 года произошли интенсивные протечки дамбы № 1 хвостохранилища ОАО «Ковдорский ГОК», приведшие практически к аварийной ситуации гидротехнического сооружения (рис. 1). Проведенные Горным институтом КНЦ РАН специальные комплексные исследования, прежде всего инновационные георадарные зондирования дамбы, позволили локализовать зоны повышенной фильтрации и выдать рекомендации по укреплению нижнего склона. Комбинат оперативно выполнил необходимые работы по укреплению нижнего склона дамбы, что позволило снять остроту проблемы.



Рис. 1. Протечки на ограждающей дамбе № 1 хвостохранилища Ковдорского ГОКа

В соседней Финляндии 4 ноября 2012 года на руднике «Талвиваара» (расположенном в области Кайнуу) дал течь резервуар со сточными водами [10]. Отходы, содержащие уран, попали в водную систему; на сайте STUK имеется сообщение, согласно которому концентрация урана в водных источниках выросла более чем в 50 раз. По мне-

нию финских специалистов, эта авария стала одной из крупнейших для страны, повлекшей большие экологические последствия.

Анализ этих и других инцидентов показывает, что основной причиной аварий стало локальное или полное разрушение ограждающих насыпных (или намывных) грунтовых сооружений вследствие скрыто формирующихся в их теле зон повышенной фильтрации, водопроводящих каналов и последующего интенсивного размыва нижнего склона. Проблема заключается в том, что зоны повышенной фильтрации, развивающиеся в теле насыпных грунтовых сооружений, на начальных этапах визуально и традиционными методами не обнаруживаются. Перерастая в дальнейшем в фильтрационно-деформационные зоны, эти процессы проявляются в виде интенсивных протечек и размывов, то есть фактически создают чрезвычайную ситуацию с реальной угрозой аварии, требующую безотлагательного принятия защитных и укрепляющих мер. Это предопределяет применение специальных исследований и мониторинга, позволяющих выявить и, самое главное, локализовать зоны повышенной фильтрации на ранних стадиях их формирования. Такие исследования, базирующиеся на применении георадаров, выполняются Горным институтом КНЦ РАН [5].

В частности, в связи с проявившейся повышенной проницаемостью плотины на реке Пиренга, Горным институтом были проведены комплексные экспериментальные и компьютерные исследования, что позволило выполнить количественную и качественную оценку состояния плотины, определить и трассировать депрессионную плоскость и выявить скрытые зоны повышенной фильтрации.

ПИРЕНГСКАЯ ПЛОТИНА

Пиренгская плотина является одной из плотин каскада Нивских ГЭС-1, расположенной у истока реки Пиренга, в нежилом поселке Пиренга. Река берет начало в озере Нижняя Пиренга на высоте 137,1 м над уровнем моря, протекает по территории городского округа г. Полярные Зори Мурманской области и впадает в озеро Имандра на высоте 127,5 м.

Плотина насыпана моренным грунтом на моренное основание с предварительной срезкой на нем растительного слоя на глубину до 0,7 м. Моренные грунты, слагающие как основание, так и саму плотину, представлены в основном гравелистым песком, местами с небольшими прослойками легкой супеси, песчаного гравия, среднезернистого и мелкозернистого песка. По инженерно-геологическим и геодезическим данным был построен геолого-структурный разрез плотины, на котором указаны основные ее элементы, геометрические размеры, абсолютные отметки гребня, уступов, поверхности основания,

а также минимального и текущего уровней воды (рис. 2). Длина плотины составляет около 350 м; примерно посередине расположен водосбросный шлюз шириной около 20 м, который разделяет ее на две части: левобережную и правобережную. По створу плотины на ее гребне имеется ряд пьезометрических станций, отметка уровня воды в которых на момент исследований составляла около 130 м.

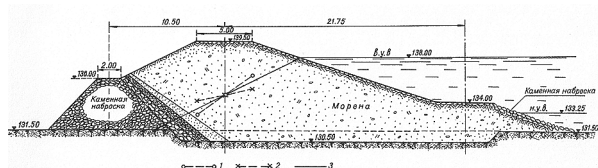


Рис. 2. Геолого-структурный разрез Пиренгской плотины

ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные определения включали в себя георадиолокационное продольное и поперечное профилирование гребня и низового склона левобережной и правобережной частей плотины на глубину до 20 м с применением георадарного комплекса RAMAC/GPR X3M [5]. Работы проводились по специальной методике с использованием экранированной антенны с частотой 100 МГц посредством перемещения радарного комплекса с одометром и контрольными метками по профилям. Результаты определений в реальном времени отображались на мониторе управляющего блока и записывались в файл для последующей обработки с использованием специализированной программы RadExplorer. Всего было выполнено свыше 10 продольных и 5 поперечных профилей общей протяженностью около 3500 м.

Обработка и интерпретация георадарных данных включала в себя выполнение следующих работ:

- выделение осей синфазности отраженных волн на радарограммах, которые являлись полезными отражениями, то есть были связаны с реальными отражающими границами в теле плотины;
- предварительное выделение на радарограммах основных инженерно-геологических и гидрогеологических элементов, используя геологические сведения о строении плотины, сведения об уровне воды по данным пьезометров на момент проведения полевых измерений: положение депрессионной плоскости, граница между насыпными грунтами и моренным основанием, положение старого русла реки;
- построение, с привлечением справочных и тарировочных данных, временной георадиолокационной модели плотины;
- определение, на основе количественного анализа волн дифракций от дифрагирую-

щих объектов, скоростей распространения волн в грунтах от дневной поверхности до выделенных структур, которые составили от 8,32 см/нс в приповерхностном слое до 7,74 см/нс на глубине старого русла реки, что соответствует диапазону диэлектрической проницаемости грунтов от 13 до 17;

- задание для выделенных элементов георадиолокационной модели значений диэлектрической проницаемости: для слоя от дневной поверхности до отметок примерно 131 м $\epsilon = 13$, для зоны перехода к увлажненным грунтам (131–129 м) $\epsilon = 25$, для основания (ниже отметок 129–126 м) $\epsilon = 17$;
- преобразование временной георадиолокационной модели плотины в глубинную;
- уточненное выделение – геометризация – на радарограммах основных инженерно-геологических и гидрогеологических элементов плотины и основания;
- детальный анализ волновых картин на радарограммах с целью выявления зон неоднородностей и повышенной фильтрации (дифференциация на участки и области, которые отличаются друг от друга характером рисунка, поверхностями угловых несогласий, резкими изменениями амплитудно-частотных характеристик результирующего сигнала).

После выполнения вышеперечисленных работ с учетом выбранных критериев была построена интерпретированная радарограмма, представляющая собой геолого-структурный разрез плотины с выделением депрессионной плоскости, границы между насыпными грунтами и моренным основанием, а также зоны повышенной влагонасыщенности и фильтрации (рис. 3).

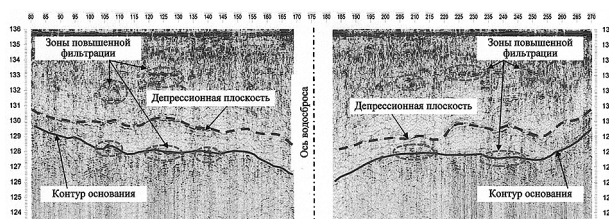


Рис. 3. Фрагмент интерпретированной радарограммы по продольной оси плотины (овалами показаны зоны повышенной водонасыщенности и фильтрации)

Как видно на рис. 3, депрессионная плоскость четко локализована на отметках от 131 м у берегов с относительно плавным понижением до 129 м у оси водосброса. Криволинейность ее поверхности обусловлена неоднородностью слагающих плотину грунтов, местоположением границы между насыпными грунтами и основанием и неравномерностью фильтрации воды сквозь плотину. Ниже плоскости депрессии, примерно на 1–2 м, определяется контур старого русла реки, в пределах которого идентифицированы

зоны повышенной фильтрации: три в левобережной и две в правобережной части плотины. Над плоскостью депрессии, до 2–4 м, также идентифицировано несколько зон повышенного водонасыщения (и, возможно, фильтрации) – вероятно, «верховодка».

СЕЙСМОТОМОГРАФИЯ

Совместно с георадиолокационным зондированием Пиренгской плотины были выполнены сейсмотомографические измерения (работы по сейсмотомографическим наблюдениям выполнены канд. техн. наук Н. Н. Абрамовым (ГоИ КНЦ РАН)), при этом профили георадарных и сейсмотомографических исследований по гребню плотины совпадали. Это позволило сопоставить результаты, полученные двумя волновыми методами, и повысить их надежность и достоверность.

В результате сейсмотомографического обследования были получены значения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн и их распределение в продольном сечении плотины. Было выявлено, что верхняя часть грунтов от дневной поверхности до отметок 131 м характеризуется достаточно равномерно распределенными скоростями до 0,4–0,8 км/с. На глубинах с отметками 131–129 м зафиксирован рост градиента скоростей в среднем на 50–60%. С учетом показаний пьезометров на данном участке плотины было принято, что здесь локализуется зона перехода от грунтов с естественной влажностью к влагонасыщенным и в срединной части ее формируется депрессионная плоскость. Кроме того, выполнение сейсмотомографических работ позволило, на основании полученных данных о прохождении продольной и поперечной волн в теле плотины, дополнительно определить механические характеристики слагающих ее и подстилающего моренного основания грунтов.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основании экспериментальных данных авторами построена геомеханическая модель плотины [1], [3], [4], которая была исследована в упругопластической постановке методами компьютерного моделирования при различных уровнях воды и формирования соответствующей нагрузки, имитируемой фазами нагружения. В результате моделирования получены расчетные значения и траектории перемещений грунтов плотины (рис. 4). Особое внимание уделялось анализу избыточного (активного) порового давления, оказывающего большое влияние на положение депрессионной плоскости в теле исследуемой плотины и распределение результирующих напряжений и перемещений. На рис. 4 также указаны сечения, по которым по результатам расчетов были построены эпюры напряжений и перемеще-

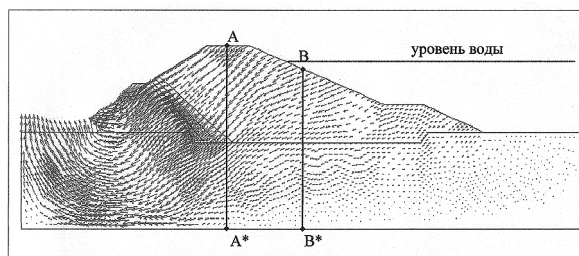


Рис. 4. Компьютерное моделирование насыпной грунтовой плотины, общие перемещения грунтов плотины (с указанием сечений для построения графиков)

ний (рис. 5) и выполнялся анализ состояния насыпной грунтовой плотины.

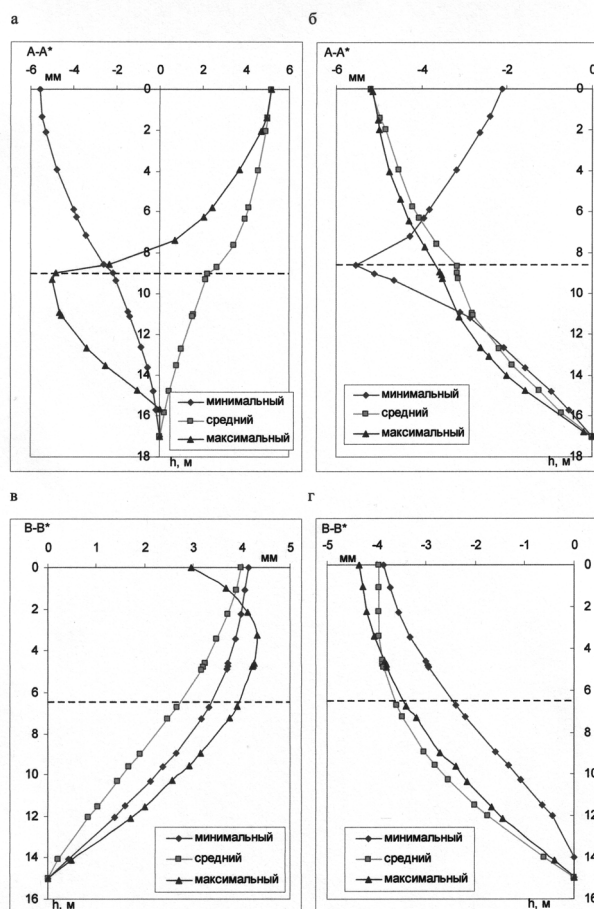


Рис. 5. Вертикальные (а, в) и горизонтальные (б, г) перемещения грунтов по вертикальным сечениям (см. рис. 4) насыпной земляной плотины: а, б – в центральной части гребня; в, г – в середине верхнего откоса

В результате всех вариантов расчетов установлены закономерности деформирования и смещения плотины, а также формирования кривой депрессии в ее теле в зависимости от свойств слагающих грунтов и уровня внешней водной нагрузки. Рис. 4 и 5 наглядно иллюстрируют, что процессы деформирования захватывают не только тело самой плотины, но и подстилающее моренное основание на глубину, примерно равную

высоте плотины (для исследуемого случая). Причем на начальной стадии нагружения (минимальный уровень воды) в центральной части плотины происходит уплотнение (усадка), но в последующем проявляется ее «выпучивание» примерно на величину усадки (см. рис. 5а). Горизонтальные перемещения гребня плотины аппроксимируются зависимостью $h = 0,15u^2 + 0,17u + 17$ и возрастают с увеличением нагрузки (уровня воды) до относительных значений 5×10^{-2} (см. рис. 5б).

Горизонтальные перемещения нагружаемого склона плотины аналогичны перемещениям гребня с достижением максимальных величин примерно 4×10^{-2} (см. рис. 5г). Вертикальные перемещения при промежуточном нагружении также имеют аналогичный характер, но при максимальном нагружении, когда уровень воды повышается и достигает уровня гребня плотины, графики вертикальных перемещений свидетельствуют об образовании в приповерхностной части зоны разуплотнения (мощностью до 0,2 высоты плотины) и далее зоны уплотнения (мощностью до 0,5 высоты плотины) (см. рис. 5в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены насыпные грунтовые гидротехнические сооружения на моренном основании с точки зрения требований к ответственным объектам. Выполнен краткий анализ аварий насыпных грунтовых плотин и дамб хвостохранилищ Мурманской области, а также резервуара со

сточными водами рудника «Талвиваара» (Финляндия).

Применительно к плотине на р. Пиренга проведены комплексные георадарные и сейсмографикские исследования, результаты которых позволили оценить состояние плотины, трассировать депрессионную плоскость и выявить локальные зоны повышенного водонасыщения и фильтрации.

На основе экспериментальных исследований построена геомеханическая модель плотины, которая исследована с использованием специальной компьютерной программы. По результатам компьютерного моделирования установлены закономерности вертикальных и горизонтальных перемещений центральной части и низового склона плотины, а также моренного основания в зависимости от свойств слагающих грунтов и уровня воды.

Результаты проведенных исследований представляют собой методологическую и научно-техническую основу для прогнозирования наиболее уязвимых мест (зон) насыпного грунтового гидротехнического сооружения на моренном основании для условий Мурманской области и Северной Карелии. В практическом приложении результаты работы использованы для оценки состояния плотины на р. Пиренга в связи с проявившейся повышенной проницаемостью как самой плотины, так и ее сопряжения с моренным основанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К а л а ш н и к А. И., К а л а ш н и к Н. А. Исследования ограждающего насыпного гидротехнического сооружения как прототипа дамбы хвостохранилища горно-обогатительного предприятия // Вестник КНЦ. 2013. № 1. С. 27–30.
2. К а л а ш н и к Н. А. Геоэкономические последствия при повреждении нефтепроводов: аспекты для Мурманской области // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2010. Т. 2. № 26. С. 101а–106.
3. К а л а ш н и к Н. А.. Компьютерное моделирование насыпной земляной плотины как прототипа ограждающей дамбы хвостохранилища // Международный научно-исследовательский журнал. Екатеринбург. 2012. № 4. С. 52–54.
4. К а л а ш н и к Н. А. Разработка автоматизированной информационной системы для решения задач геомеханики // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2007. № 11. С. 2–5.
5. М е л ь н и к о в Н. Н., К а л а ш н и к А. И. Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем // Вестник КНЦ. 2010. № 3. С. 4–8.
6. Причины аварий и повреждений плотин и их предупреждение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://engineeringsystems.ru/proektirovanie-kamennno-zemljanih-plotin/prichiny-avariy.php>.
7. Строительные нормы и правила Российской Федерации «Гидротехнические сооружения. Основные положения» СНиП 33–01–2003. Ввод в действие с 01.01.2004. М.: Госстрой России, 2004. 30 с.
8. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 23 июня 1997 г. № 117-ФЗ.
9. http://alyurdrop.ucoz.ru/publ/obezvrezhivanie_pomjotokhranilishha_utilizacija_svezhikh_pomjotnykh_mass_i_nakoplenij_na/ptf_quot_murmanskaja_quot_obezvrezhivanie_pomjotokhranilishha/17-1-0-19
10. <http://www.tetralab.ru/display/QW/Talvivaara+mine>.
11. Ritcey G. M. Tailings managemant. Elsevier; Amsterdam; Oxford; New-York; Tokyo, 1989.

Kalashnik A. I., Mining Institute of the Kola centre of Science of RAS (Apatity, Russian Federation)
Kalashnik N. A., Mining Institute of the Kola centre of Science of RAS (Apatity, Russian Federation)
Zaporozhets D. V., Mining Institute of the Kola centre of Science of RAS (Apatity, Russian Federation)

EVALUATION OF BULK EARTH STRUCTURE ON MORAINIC FOUNDATION

The bulk earth hydrotechnical structures are considered from the standpoint of requirements maintained for important facilities. Complex georadar and seismic tomography studies were performed on the dam of the River Pirenga. The obtained research results were used to construct a geomechanic model and to carry out purposeful computer modeling. Performed works allowed to make estimation of the dam condition, to site depression plane, and to reveal local zones of high water saturation and filtration. The research results can be used as a methodological and scientific-engineering basis for substantiated prediction of the most sensi-

tive areas (zones) of the earth bulk hydrotechnical facility erected on morainic foundation in conditions of Murmansk region and Northern Karelia.

Key words: bulk earth hydrotechnical structures; dam; georadar; studies; computer modeling; evaluation

REFERENCES

1. Kalashnik A. I., Kalashnik N. A. Study of a bulk hydraulic engineering construction as prototype for a tailing dam of mining and dressing enterprise [Issledovaniya ogradzhayushchego nasypnogo gidrotekhnicheskogo sooruzheniya kak prototipa damby khvostokhranilishcha gorno-obogatitel'nogo predpriyatiya]. *Vestnik KNTs* [Newsletter of Kola Science Centre]. 2013. № 1. P. 27–30.
2. Kalashnik N. A. Geoeconomic consequences of oil pipelines damage: aspects for Murmansk region [Goeconomicheskie posledstviya pri povrezhdenii nefteprovodov: aspekty dlya Murmanskoy oblasti]. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka* [The North and the market: development of economic order]. 2010. Vol. 2. № 26. P. 101a–106.
3. Kalashnik N. A. Computer modelling of the bulk earth dam as a prototype for dam tailing [Komp'yuternoe modelirovanie nasypnoy zemlyanoy plotiny kak prototipa ogradzhayushchey damby khvostokhranilishcha]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International scientific and research journal]. 2012. № 4. P. 52–54.
4. Kalashnik N. A. Design of automated informational system for solving geomechanical problems [Razrabotka avtomatizirovannoy informatsionnoy sistemy dlya resheniya zadach geomekhaniki]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in oil industry]. 2007. № 11. P. 2–5.
5. Mel'nikov N. N., Kalashnik A. I. Innovative georadar research technologies for subsurface structure and state of natural-technical systems [Innovatsionnye georadarnye tekhnologii izucheniya podpoverkhnostnoy struktury i sostoyaniya prirodno-tekhnicheskikh sistem]. *Vestnik KNTs* [Vestnik of Kola Science Centre]. 2010. № 3. P. 4–8.
6. *Prichiny avari i povrezhdeniy plotin i ikh preduprezhdenie* [Causes of accidents and damages of dams, and preventive measures]. Available at: <http://engineeringssystems.ru/proektirovanie-kamennno-zemljanih-plotin/prichini-avariy.php>
7. *Stroitel'nye normy i pravila Rossiyskoy Federatsii "Gidrotekhnicheskoy sooruzheniya. Osnovnye polozheniya"* SNiP 33–01–2003 [RF Construction codes and regulations «Hydraulic engineering constructions. Main principles» SNiP 33–01–2003]. Start-up 01.01.2004 Moscow, The Russian Federation State Committee for Construction, Architectural and Housing Policy Publ., 2004. 30 p.
8. *Federal'nyy zakon "O bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy ot 23 iyunya 1977 g. № 117-FZ"* [Federal law “On Safety of Hydraulic engineering constructions”] June 23, 1997. № 117-FL
9. http://alyudrop.ucoz.ru/publ/obezvrezhivanie_pomjotokhranilishha_utilizacija_svezhikh_pomjotnykh_mass_i_nakoplenij_na/ptf_quot_murmanskaja_quot_obezvrezhivanie_pomjotokhranilishha/17-1-0-19
10. <http://www.tetralab.ru/display/QW/Talvivaara+mine>.
11. Ritcey G. M. Tailings management. Elsevier; Amsterdam; Oxford; New-York; Tokyo, 1989.

Поступила в редакцию 03.04.2014