

проницаемость, которая значительно меняется вследствие массового взрыва в массиве горных пород.

3. Выявленные особенности геолого-структурного строения скального массива при отработке карьера позволяют выполнить подбор рациональных параметров буровых, взрывных и экскаваторных работ, оптимально учитывающих эти особенности, и позволяющие обеспечить максимально возможное равномерное дробление горной массы для последующих технологических этапов ее обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. - Изд-во МГУ, 2005. - 153с.

2. Калашник А.И. Исследования георадарами структуры и текущего состояния горных пород, слагающих уступы основного карьера Ковдорского ГОКа / А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, А.Ю. Дьяков, С.В. Казачков, В.А. Сохарев // Горный журнал. – 2014. – № 4. – С.60-64.

3. Калашник А.И. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера / А.И. Калашник, А.Ю. Дьяков // Изв. вузов. Горный журнал. - 2015. - № 6. – С.73-78.

4. Калашник А.И. Оценка нарушенности скальных пород уступа карьера электромагнитным зондированием / А.И. Калашник, А.Ю. Дьяков // Горный информационно-аналитический бюллетень - 2015. - Глубокие карьеры. Специальный выпуск № 56. - С.230-238.

5. Гензе Д.А. Диэлектрическая проницаемость грунтов нарушенной структуры / Д.А. Гензе, А.Н. Шуваев // Вестник ТГАСУ. - 2011. - №1. - С. 200-206.

УДК 622.831.3:627.43(470.21)

## ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ НАСЫПНОЙ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ ГЭС ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н.А. Калашник<sup>1</sup>, А.И. Калашник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>научный сотрудник, e-mail: [nadezhda-kalashnik28@rambler.ru](mailto:nadezhda-kalashnik28@rambler.ru)

<sup>2</sup>кандидат технических наук, заведующий лабораторией геофлюидомеханики, e-mail: [kalashnik@goi.kolasc.net.ru](mailto:kalashnik@goi.kolasc.net.ru)

<sup>1, 2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Россия

**Аннотация.** Приведены результаты компьютерного моделирования насыпной грунтовой плотины ГЭС и подстилающего породного основания в целях выявления особенностей их фильтрационно-деформационного состояния. Гидрогеомеханическое моделирование выполнено для системы «водоем-плотина-основание» с использова-

нием специализированной компьютерной программы. Комплексный анализ данных компьютерного моделирования и георадарного зондирования позволил выявить особенности фильтрационно-деформационного состояния насыпной грунтовой плотины ГЭС, что предоставляет научно-техническую основу для решения задач обеспечения механической прочности и противофильтрационной устойчивости таких плотин.

*Ключевые слова: насыпная плотина ГЭС, гидрогеомеханическое моделирование, георадарное зондирование, особенности фильтрационно-деформационного состояния.*

## FEATURES OF THE FILTRATIONAL AND DEFORMATION CONDITION OF THE BULK SOIL DAM OF HYDROELECTRIC POWER STATION ACCORDING TO COMPUTER MODELLING

Nadezhda Kalashnik<sup>1</sup>, Anatolii Kalashnik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific Researcher, e-mail: [nadezhda-kalashnik28@rambler.ru](mailto:nadezhda-kalashnik28@rambler.ru)

<sup>2</sup>Dr.(Eng), Head of laboratory, e-mail: [kalashnik@goi.kolasc.net.ru](mailto:kalashnik@goi.kolasc.net.ru)

<sup>1,2</sup>Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russia

**Abstract.** Results of computer modeling of a bulk soil dam of hydroelectric power station and the spreading pedigree basis for detection of features of their filtration and deformation state are given. Hydrogeomechanical modeling is executed for the reservoir-dam-basis system with use of the specialized computer program. The complex analysis of data of computer modeling and Georadar sounding has allowed to reveal features of a filtration and deformation condition of a bulk soil dam of hydroelectric power station that provides a scientific and technical basis for the solution of problems of ensuring mechanical durability and antifiltrational stability of such dams.

*Keywords: bulk hydroelectric dam, hydro geomechanical modeling, Georadar sensing, especially permeability and strain state.*

**Введение.** Во многих случаях насыпные грунтовые гидротехнические сооружения (ГТС) представляют собой плотины гидроэлектростанций (ГЭС), а также ограждающие дамбы накопителей жидких промышленных отходов. Такие ГТС, в зависимости от их размеров, являются потенциально опасными объектами I-го и II-го класса, эксплуатация которых должна выполняться в строгом соответствии с требованиями промышленной безопасности, регламентируемыми Федеральным законом «О безопасности гидротехнических сооружений» [1] и Строительными нормами и правилами РФ «Гидротехнические сооружения. Основные положения» [2]. Нарушение фильтрации и функциональности, потеря устойчивости таких плотин и дамб 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 промышленного предприятия), дополнительным затратам на ремонтно-восстановительные работы: плотин, дамб, пульпопроводов, дорог, линий электропередач, пьезометрических станций, устройств и механизмов, и др.; сверхплановым затратам на ликвидацию последствий аварии, восстановление окружающих природных систем и штрафов за загрязнение окружающей среды и нанесенный экологический ущерб [3-4].

**Цель работы.** Целью работы являлось выявление особенностей фильтрационно-деформационного состояния насыпной грунтовой плотины ГЭС и подстилающего породного основания по данным компьютерного моделирования и георадарного зондирования.

**Чрезвычайные ситуации и аварии.** Мировой опыт эксплуатации насыпных грунтовых плотин и ограждающих дамб накопителей жидких промышленных отходов имеет примеры возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий, наиболее известные из которых: плотины: Боулдерхэд (Великобритания), Фонтенель (США), Киселевское водохранилище (РФ); накопители отходов: Качканарский ГОК (РФ), рудник Эль-Кобра (Чили), Карамкенский ГМК (РФ), углеобогащательная фабрика в Буффало-Крик (США), шахта «Преставель» (Италия), шламоохранилище завода «MAL Hungarian Alumium» в Колонтаре (Венгрия), ОАО «Аммофос» (РФ) и др. В таблице приведена выборка из опубликованных данных [4-6] по чрезвычайным ситуациям и авариям насыпных плотин и накопителей жидких промышленных отходов.

**Анализ причин.** Анализ произошедших 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 нижнего склона, то есть фактически создают чрезвычайную ситуацию с реальной угрозой аварии, требующую безотлагательного принятия защитных и укрепляющих мер. Это предопределяет применение инновационных исследований, базирующихся на современных методах и оборудовании, позволяющих выявить и, самое главное, трассировать зоны повышенной фильтрации на ранних стадиях их формирования. Такие исследования, базирующиеся на применении георадарного подповерхностного зондирова-

ния и гидрогеомеханического компьютерного моделирования, выполняются Горным институтом КНЦ РАН [7].

Таблица - Данные по чрезвычайным ситуациям и авариям насыпных грунтовых ГТС (по 4-6)

Страна, местоположение	Наименование	Хар-ка плотины / Тип отходов	Год аварии	Причина и следствие аварии
США, Вайоминг	Фонтенель	Высота 50 м, длина 2000 м	1964, 1982	Протечки и оползень на низовом откосе
Великобритания, Боулдерхэд	Боулдерхэд	Высота 48 м, длина 914 м	1967 - 1968	Оползни на низовом откосе и провал до 2,5 м на гребне
Россия, Свердловская область	Киселёвское водохранилище	Высота 17 м, длина 2 км	1993	Прорыв при наполнении водохранилища
Финляндия, Кайнуу	Рудник «Талвиваара»	Отходы производства никеля, цинка, урана	2012	Сильные протечки сквозь ограждающую дамбу
Россия, Белгородская область	Лебединский ГОК	Отходы железорудного производства	1981	Прорыв меловой пульпы, разрушение дамбы (300 м по фронту)
Украина, Львовская область	Стебниковский ГХК	Отходы производства калийных удобрений	1983	Прорыв 5 млн. м <sup>3</sup> жидкой фазы хвостов, вследствие образования ослабленной зоны в теле дамбы
ЮАР	Рудник «Бэфокинг»	Отходы платиновой промышленности	1985	Прорыв (около 3 млн. м <sup>3</sup> ) и разрушение дамбы на 2/3 высоты после сильного дождя, хвосты затопили ствол шахты

**Экспериментальные исследования.** Горным институтом КНЦ РАН были проведены комплексные георадарные и компьютерные исследования насыпной грунтовой плотины на реке Пиренга в целях оценки ее состояния, структуры, положения депрессионной плоскости фильтрующихся вод и подстилающего породного основания. Река Пиренга протекает по территории городского округа г. Полярные Зори Мурманской области [8]. Берёт

начало в озере Нижняя Пиренга на высоте 137,1 м над уровнем моря и впадает в озеро Имандра на высоте 127,5 м. У истока, в нежилом посёлке Пиренга, река преграждена плотиной каскада Нивских ГЭС-1. По данным государственного водного реестра РФ река относится к Баренцево-Беломорскому бассейновому округу, водохозяйственный участок - к реке Нива и озеро Имандра (самое большое озеро Мурманской области).

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 [9]. По данным зондирования была уточнена структура плотины, контур подстилающего моренного основания, старое русло реки, определена и трассирована депрессионная плоскость, а также выявлены скрытые локальные зоны неоднородности (в пределах которых с большой вероятностью могут образоваться зоны повышенной фильтрации) (рис. 1). Механические характеристики слагающих плотину грунтов, были приняты по данным выполненных здесь сейсмотомографических наблюдений<sup>1</sup>.

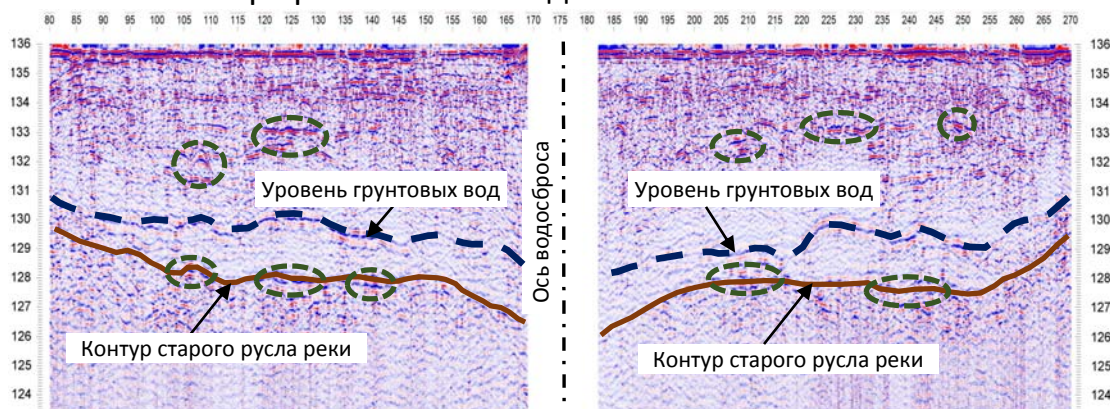


Рисунок 1 – Фрагмент радарограммы по продольной оси по гребню плотины (овалами показаны идентифицированные зоны неоднородности)

**Компьютерное моделирование.** На основании экспериментальных данных была построена гидрогеомеханическая модель плотины (рис. 2), которая исследована в упругопластической постановке с использованием специализированной компьютерной программы PLAXIS при различных уровнях воды в реке (рис. 2 б) [10-11]. В результате моделирования получены картины напряженно-деформированного состояния плотины, общие перемещения грунтов (рис. 2в, г, е) и активного порового давления (рис. 2 д). На рис. 2е указаны также сечения, по которым по результатам расчетов были построены эпюры напряжений и перемещений и выполнялся количественный анализ состояния насыпной грунтовой плотины.

<sup>1</sup>Работы по сейсмотомографическим наблюдениям выполнены к.т.н. Н.Н. Абрамовым (ГоИ КНЦ РАН)

**Анализ результатов.** На рис. 3 приведены графики горизонтальных и вертикальных перемещений, а также сдвиговых напряжений по наклонным плоскостям, близким к поверхности ( $E^*-E$ ) и положению депрессионной плоскости в теле исследуемой плотины ( $F^*-F$ ) в зависимости от уровня воды в реке.

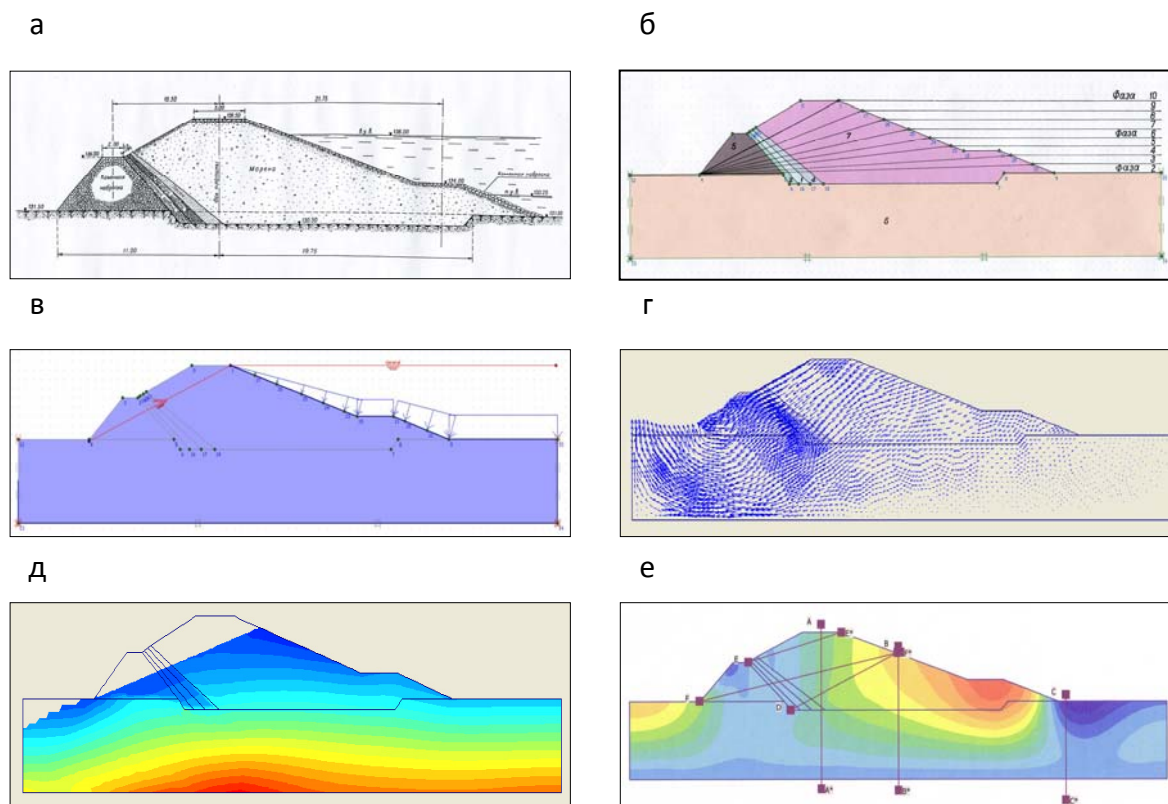


Рисунок 2 – Схематическое отображение компьютерного моделирования насыпной грунтовой плотины:

а - исходная схема, б - геометрическая модель с указанием моделируемых уровней воды, в - моделируемые нагрузки, г - общие перемещения грунтов плотины, д - картина избыточного (активного) порового давления, е - картина результирующих напряжений (с указанием сечений для построения эпюр)

Как видно из рис. 3а, б, повышение уровня воды в реке до максимального приводит к достаточно существенным горизонтальным смещениям грунтов (до 15-17 мм при максимальном уровне), характер изменения которых идентичен по обоим сечениям. При этом вертикальные смещения в 2-3 раза меньше на верхнем склоне и имеют характер постепенного затухания к нижнему склону (рис. 3в, г). Отличия на графиках рис. 3г на интервалах 50-80м обусловлены тем, что выбранное для анализа сече-

ние F\*-F здесь проходит через дренажные сооружения и каменную наброску.

Характер сдвиговых напряжений для обоих сечений идентичен (рис. 3д, е). При этом на срединном сечении F\*-F значения напряжений примерно в 2 раза выше, чем на приповерхностном E\*-E (отклонения на интервале 50-80 м также объясняются пересечением дренажных сооружений и каменной наброски).

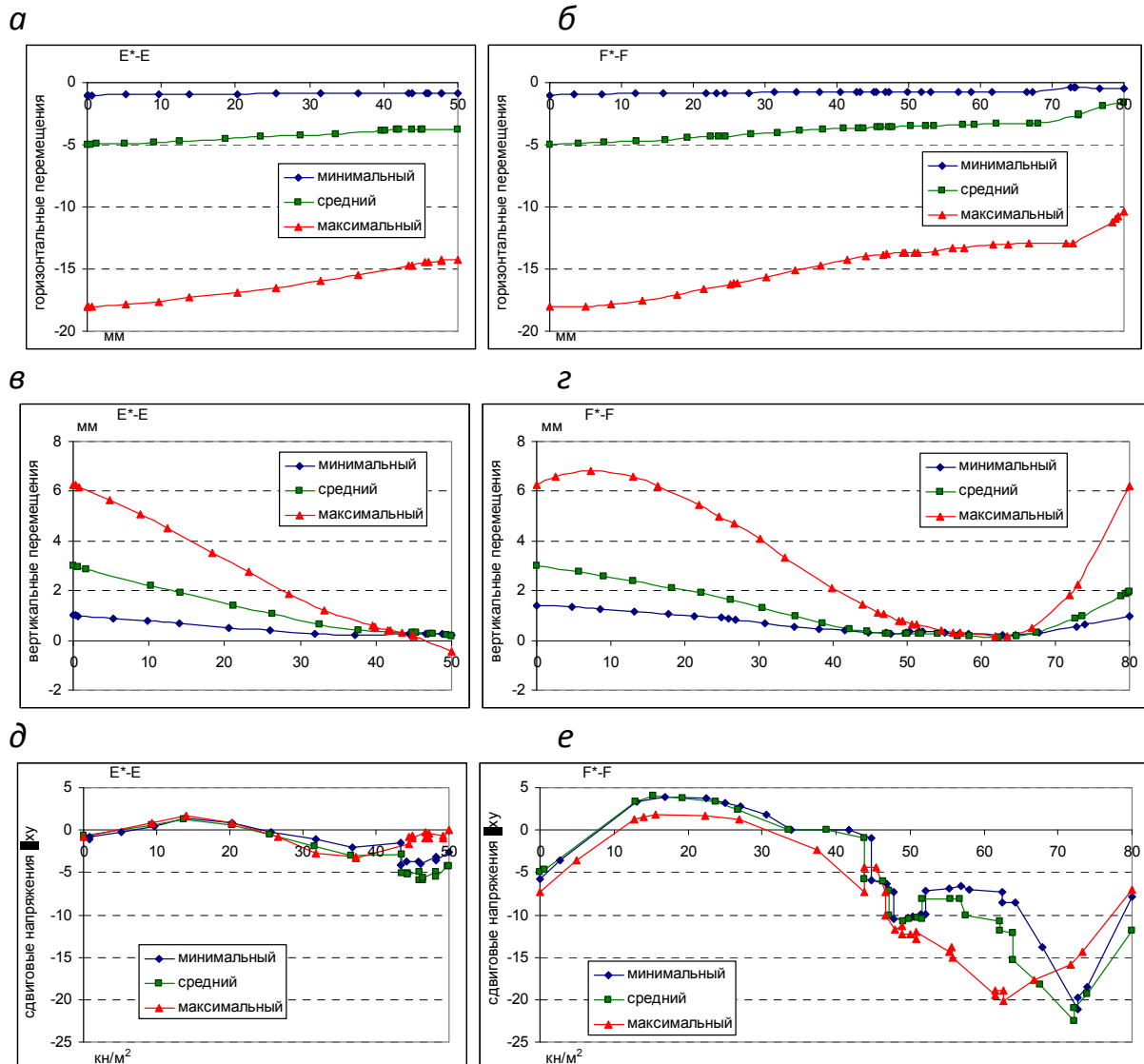


Рисунок 3 – Зависимость горизонтальных и вертикальных перемещений, а также сдвиговых напряжений в наклонных приповерхностном E\*-E (а, в, д) и срединном F\*-F (б, г, е) сечениях плотины от уровня воды в реке

**Выводы.** Выполненное компьютерное моделирование позволило выявить особенности фильтрационно-деформационного состояния насыпной грунтовой плотины ГЭС. Установлено, что смещению и дополнительному



нагрузению подвергаются грунты как самой плотины, так и подстилающего основания, с затуханием на глубине, примерно равной 1,5 высоты плотины (для максимального уровня воды в реке) [10-11]. Направление общих перемещений коррелируется с действующей водной нагрузкой. При этом значения смещений и напряжений значительно ниже критических для формирования разрушений, что дает основания оценить состояние плотины в целом как устойчивое. Выводы на основе компьютерного моделирования подтверждаются данными проведенных визуального обследования и георадиолокационных зондирований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 23 июня № 117-ФЗ, 1997.
2. 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.
3. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2014 году. - 2015. - 177 с. URL: <http://mpr.gov-murman.ru/activities/okhrana-okruzhayushchey-sredy/00.condition/index.php>
4. Проблемы защиты окружающей среды. URL: [www.secandsafe.ru](http://www.secandsafe.ru)
5. Причины аварий и повреждений плотин и их предупреждение URL: <http://engineeringsystems.ru/proektirovanie-kammenno-zemljanih-plotin/prichini-avariy.php>.
6. Гальперин А.М. Техногенные массивы и охрана окружающей среды / А.М. Гальперин, В. Ферстер, Х.-Ю. Шеф. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. - 534с.
7. Мельников Н.Н. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, А.Ю. Дьяков, Д.А. Максимов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2016. - № 1. – С.39-49.
8. URL:[http://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%E8%F0%E5%ED%E3%E0\\_\(%F0%E5%EA%E0\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%E8%F0%E5%ED%E3%E0_(%F0%E5%EA%E0))
9. Калашник А.И. Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании / А.И. Калашник, Н.А. Калашник, Д.В. Запорожец // Ученые записки ПетрГУ. Серия: Естественные и технические науки. - 2014. - №6 (143). - С. 93-99.
10. Калашник Н.А. Компьютерное моделирование насыпной земляной плотины как прототипа ограждающей дамбы хвостохранилища / Н.А. Калашник // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2012. – № 4. – С. 52-54.
11. Калашник Н.А. Компьютерное моделирование механической прочности и противодиффузионной функциональности ограждающей дамбы хвостохранилища / Н.А. Калашник // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. – Днепропетровск, 2016. - № 3. - С. 304-308.