

УДК: 627.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ВЗРЫВОНАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ КАМБАРАТИНСКОЙ ГЭС-2

И.А. Торгоев - к.т.н., директор

Льежский университет, г. Льеж (Бельгия)

Х.Б. Хавенит - д.т.н., профессор

Научно-инженерный центр «ГЕОПРИБОР» Института геомеханики и освоения недр Национальной Академии наук Кыргызстана, г. Бишкек

Аннотация

В статье представлены основные результаты комплексного мониторинга, моделирования и расчётов устойчивости взрывонабросной плотины Камбаратинской ГЭС-2 на р. Нарын в Кыргызстане.

Ключевые слова: ГЭС, плотина, мониторинг, анализ устойчивости.

GEOPHYSICAL MONITORING AND ASSESSEMENT OF THE STABILITY OF THE BLAST FILL DAM OF THE KAMBARATA HPP-2

I.A. Torgoev, H.B. Havenith

Аннотация

In this paper presents the main results of complex monitoring, modeling and calculations of the stability of the blast fill dam Kambarata HPP-2 in the Kyrgyzstan.

Key words: hydro power plant (HPP), dam, monitoring, stability analysis.

ҚАМБАРОТА ГЭС-2 ПОРТЛАТИБ КЎТАРИЛГАН ТЎҒОННИНГ ГЕОФИЗИК МОНИТОРИНГИ ВА ЧИДАМЛИЛИГИНИ БАҲОЛАШ

И.А. Торгоев, Х.Б. Хавенит

Аннотация

Мақолада Қирғизистондаги Норин дарёсида Қамбарота ГЭС-2 портлатиб кўтарилган тўғоннинг барқарорлигини комплекс мониторинги, моделлаштирилиши ва ҳисобининг асосий натижалари келтирилган.

Таянч сўзлар: гидроэлектростанция, тўғон, мониторинг, чидамлиликини таҳлил қилиш.

Введение. Одним из главных этапов строительства Камбаратинской ГЭС-2 (КГЭС-2) стало возведение плотины на р. Нарын (рис.1). Причём для сооружения плотины был избран не общепринятый, а взрыво-набросной метод строительства: с помощью крупномасштабного массового взрыва (КМВ) 2000 тонн взрывчатого вещества (ВВ), произведённого на правом борту каньона 22 декабря 2009 г. [1,5]. Предполагалось, что в результате направленного массового взрыва сформируется искусственный оползень типа «каменной лавины» и в русле р. Нарын образуется скальный навал объёмом около 3 млн. м³ и высотой до 60 м. Однако из-за того, что при КМВ основная часть энергии взрыва прорвалась через зону дробления тектонического разлома «Южный» значительный объём взорванных пород был перемещен в сай с западной стороны этого разлома и взрываемого склона. По этой причине существенно уменьшился объём навала в створе плотины, что потребовало досыпки плотины до проектной отметки гребня 961 м обычным способом.

Многослойное тело плотины КГЭС-2, сформированное в результате КМВ и последующей досыпки до проектного уровня традиционным способом, получилось весьма неоднородным как по своим геотехническим, так и по геофильтрационным свойствам.

В этой связи. Научно-инженерным центром «ГЕОПРИБОР» в сотрудничестве с командой Льежского университета (Бельгия) и специалистами ПИИ «Гидропроект» (г.Кара-Куль) были выполнены геофизические исследования и осуществлен комплексный мониторинг состояния плотины, результаты которых стали основой для расчётов и моделирования устойчивости неоднородной плотины КГЭС-2.

Методика исследований и результаты комплексного мониторинга. Для изучения строения и мониторинга состояния плотины использовались современные геофизические методы: вертикальное электрическое зондирование в варианте резистивной томографии (ЭРТ) по 8 профилям (рис.1) с глубиной зондирования до 100 м;

микросейсмические измерения (СМР), горизонтальной (Н) и вертикальной (V) компонент микросейсмического шума для выявления локальных эффектов усиления сейсмических колебаний и оценки мощности различных слоёв в теле плотины. Для мониторинга фильтрационных процессов в теле плотины использовались пьезометрические наблюдательные скважины, обустроенные в 2010 г. [2, 3].

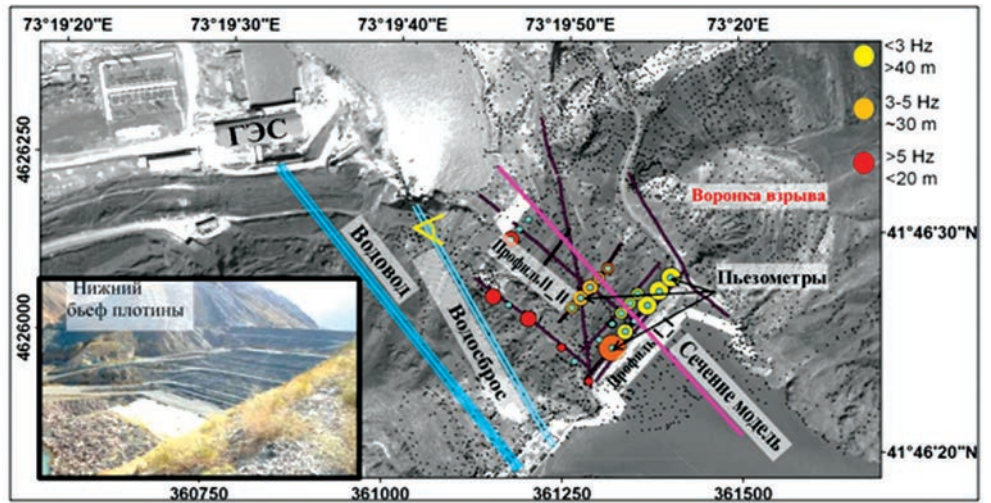
На рис. 1 представлена карта-схема расположения профилей ЭРТ, пунктов измерения СМР и пьезометрических скважин на исследуемом участке плотины и её бортовых примыканиях. Методика геофизических исследований и основные результаты комплексного мониторинга подробно изложены в ряде наших публикаций [1, 2, 3, 4]. Эти исследования послужили основой для моделирования геоструктуры и оценки устойчивости плотины КГЭС-2, результаты которых изложены ниже.

Комплексные геофизические исследования тела плотины КГЭС-2 показали, что взорванный навал горной породы, представляющий около 60-70% её общего объёма, характеризуется относительно высокими удельными сопротивлениями (> 500 Ом) и средними сейсмическими скоростями (скорость S-волны около 500 м/с).

Результаты режимной электротомографии и пьезометрического мониторинга свидетельствовали о наличии в теле плотины двух основных фильтрационных потоков:

Во-первых, была выявлена фильтрация через аллювиальные отложения в основании плотины, на участке засыпанного русла р. Нарын. На поперечных геоэлектрических разрезах I-I, построенных по данным, полученным в 2012-2014 г., на отметках ниже 945 м в теле плотины выделяется зона сильного водонасыщения, показанная тёмно-зелёным цветом (рис.2 б), приуроченная к аллювиальным отложениям донной части каньона р. Нарын, то есть связанная с фильтрационным потоком, существующим в основании плотины [2, 3].

Во-вторых, вода из водохранилища периодически просачивается через два фильтрационных окна в насыпной левой верхней части плотины (рис.2б), на участке



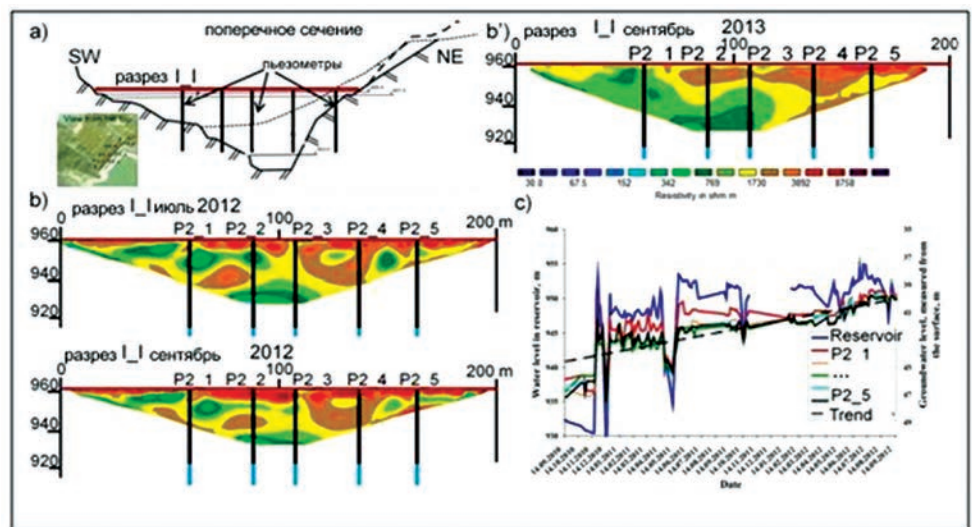
карта расположения восьми профилей ЭРТ (тёмные линии), пунктов измерений СМР (жёлто-красные кружки) и пьезометрических скважин (зелёные точки) в контурах плотины КГЭС-2. Лиловая линия-продольный профиль моделирования устойчивости плотины.

Рис.1. Плотина КГЭС-2

между осью плотины и левым бортовым примыканием. Эта водонасыщенная зона, находится в верхней части плотины, отсыпанной поверх навала скальных пород из воронки взрыва и в плане её контуры наследуют контуры потока, возникшего через несколько часов после КМВ при переливе через навал.

Сопоставление данных пьезометрического мониторинга в створе скважин 2.1-2.5 (рис.2с), пробуренных на гребне плотины, с результатами контроля уровня воды в верхнем бьефе свидетельствуют о том, что уровень воды в наблюдательных скважинах изменяется практически синхронно с уровнем воды в водохранилище КГЭС-2. Как видно на рис.2с в долговременном аспекте отмечается тенденция постепенного подъёма воды в пьезометрических скважинах на гребне плотины.

Основные результаты трёхмерного (3D) моделирования: В рамках аналитических расчётов по оценке и моде-



а) поперечное сечение плотины I-I с указанием положения пьезометрических скважин P2.1-2.5; б, в) электротомограммы по профилю I-I, полученные в различные интервалы времени; с) результаты пьезометрического мониторинга

Рис.2. Результаты комплексного мониторинга по профилю на гребне плотины КГЭС-2

лированию устойчивости плотины КГЭС-2 для получения её 3-х мерной геолого-геофизической модели использовались геофизические и геотехнические данные [4,5]. Данные, использовавшиеся для построения трёхмерных (3D) моделей плотины, были сформированы (получены) из четырёх источников информации. Трёхмерная цифровая модель рельефа (ЦМР) плотины с разрешением до 0,5 м построена на основе результатов теодолитной съёмки. Данные ЭРТ были использованы для построения и оцифровки различных по геотехническим и гидрогеологическим свойствам слоёв в теле плотины.

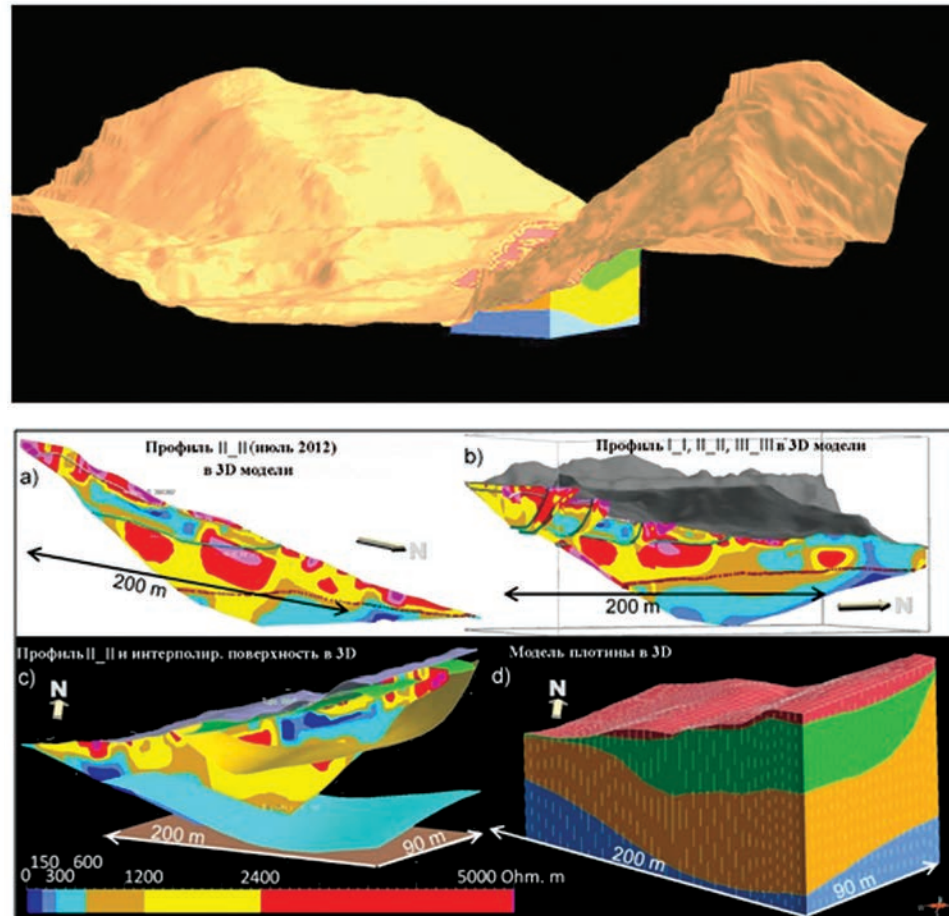
Информация о предполагаемом внутреннем строении плотины и геотехнических свойствах различных материалов, слагающих её тело, была получена при изучении проектно-строительной документации, включая чертежи исполнительной съёмки после взрыва и окончательной отсыпки плотины. Результаты пьезометрических наблюдений по сети наблюдательных скважин, начатых в сентябре 2010 г., использовались для построения депрессионных поверхностей и калибровки (уточнения) гидрогеологической модели.

При 3-х мерном (3D) геологическом моделировании использовался программный пакет GOCAD. С помощью этой программы удалось достаточно точно интерпретировать геологическое строение массива горных пород, используя геофизические данные, результаты разведочного бурения, а также данные инженерно-геологических изысканий.

В частности, построенная трёхмерная (3D) модель (рис.3с,3d) в основном базируется на геоэлектрической информации, полученной в процессе мониторинга состояния плотины с помощью ЭРТ.

Все геофизические профили были обработаны с применением ГИС-технологии, а затем отформатированы для их представления в 3D-модели, созданной с помощью программного обеспечения GOCAD. Процедура построения трёхмерной модели плотины выглядит следующим образом: сначала в программу GOCAD вводились двумерные электротомографические профили (I-I, ... VIII-VIII), полученные с помощью ЭРТ в различные периоды времени [2, 3, 4, 5]; затем в программу вводились стратиграфические слои с различным удельным электрическим сопротивлением (УЭС), которые после оцифровки отражали структуру (строение) плотины; часть 3-х мерной модели тела плотины была построена на основе оцифрованных данных встроенных граничных областей. В результате комбинирования геофизических, геотехнических данных со структурой плотины было выделено три характерных контактных поверхности (границы) в трёхмерной модели плотины (рис.3d), разделяющие зоны с различными УЭС.

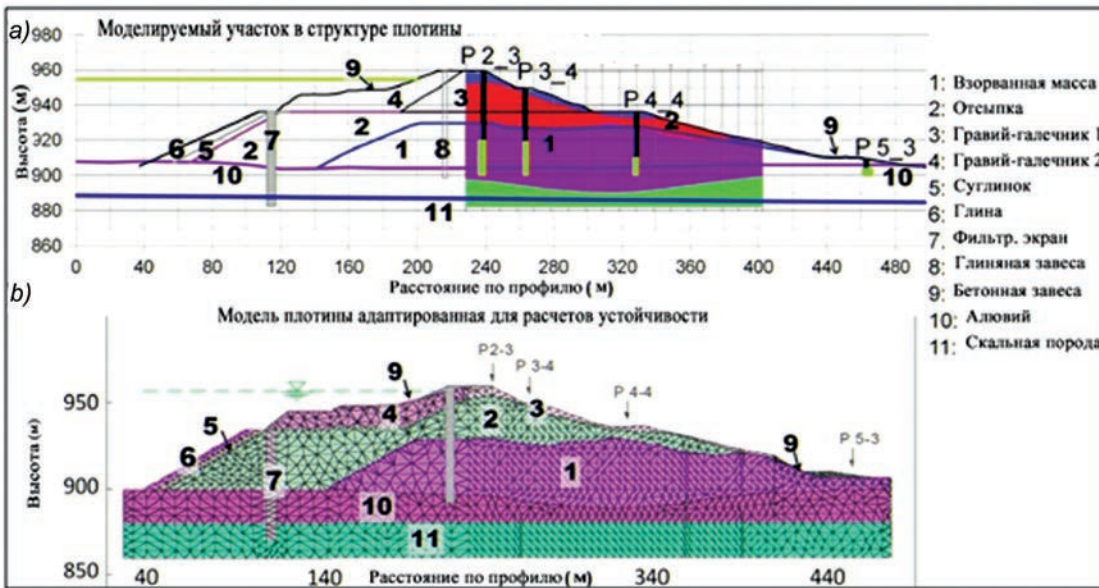
На рис. 4 показан графический результат сопоставления продольного ЭРТ-профиля II-II (рис.1) с геотехническим строением плотины. Основная часть тела плотины сложена сброшенной при взрыве раздробленной массой



а), б) оцифровка различных зон по УЭС; в) объёмная конфигурация грани, интерполированная по данным УЭС; д) объёмная модель строения плотины по интерполированным границам.
Рис.3. Трёхмерные модели рельефа прилегающих бортов и плотины КГЭС-2

скальных пород (1), поверх которой отсыпана часть раздробленной горной массы из воронки взрыва (2). Верхняя часть гребня плотины отсыпана гравийно-галечниковой смесью аллювиального материала (3, 4) различного гран-состава. Внешний откос в верхнем бьефе плотины сформирован с помощью отсыпки суглинка (5), покрытого слоем глины (6). Со стороны верхнего бьефа водохранилища был обустроен противодиффузионный экран (7), представляющий собой цепочку скважин, пробуренных до коренных пород (11), в которые нагнетался бентонитовый раствор. Второй противодиффузионный экран был обустроен вдоль гребня плотины (8) по нашей рекомендации. На верхнем и низовом откосах дамбы были уложены бетонные плиты для предотвращения размыва откосов (9). Вся дамба покоится на аллювиальных отложениях (10) русла р. Нарын мощностью 10–15 м, подстилаемых коренными породами (11).

Гидрогеологическое моделирование (рис.5а,5б) выполнялось с помощью компьютерной программы GGU SS-FLOW2D на основе числен-



а) продольный профиль плотины, смоделированный с учётом основной секции моделирования, полученной из 3D модели; б) конечно-элементная модель для гидрогеологического моделирования и расчетов устойчивости, построенная на основе скорректированного двухмерного разреза плотины.

Рис.4. Строение плотины КГЭС-2 по геофизическим и геотехническим данным

ного моделирования методом конечных элементов для калибровки относительно неопределённых (расчётных) коэффициентов фильтрации K_f , предоставленных ПИИ «Гидропроект». Необходимость калибровки была вызвана тем, что эти данные по K_f были получены расчётным, а не опытным путём. Калибровка осуществлялась с учётом данных по пьезометрическим уровням в скважинах P2-3, P3-4, P4-4 и P5-3, расположенных по главной продольной оси II-II плотины (рис. 1).

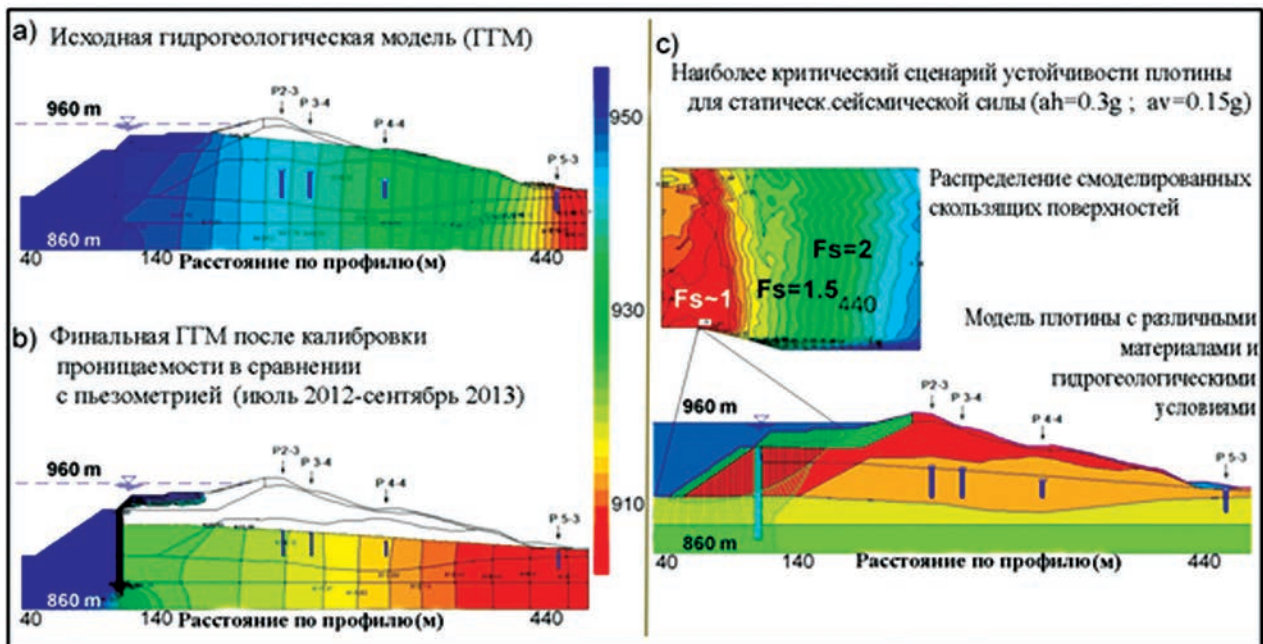
Оценка и моделирование устойчивости плотины.

В качестве исходных данных для расчётов устойчивости

использовались различные сценарии с различными уровнями воды в водохранилище и, связанные с ними гидрогеологические условия в теле плотины [5]. При расчётах устойчивости откосов плотины применялась компьютерная программа GGU-STABILITY, которая позволяет выполнять классические статические расчёты устойчивости, а также использовать псевдо-статические методы с учётом различных сейсмических воздействий.

Наиболее значимые предельные сценарии неустойчивости (коэффициент устойчивости $F_s \leq 1$), смоделированные при статической постановке, включали в себя: локальную или общую неустойчивость откоса в верхнем бьефе плотины (рис. 5б) соответственно при быстрой сработке (опорожнении) водохранилища за счёт большого градиента падения водной нагрузки и быстрого уменьшения порового давления в теле плотины при полном его опорожнении.

Для повышения эффективности цементационной завесы и снижения неблагоприятного воздействия фильтрационного потока №2 на устойчивость низового откоса



а) исходная модель; б) модель с откорректированными значениями K_f , полученными путём сравнения результатов моделирования с измеренными пьезометрическими уровнями в июле 2012-сентябрь 2013 г.; в) один из вариантов расчёта устойчивости плотины по наиболее критическому сценарию.

Рис.5. Гидрогеологические модели

плотины рекомендовано с помощью буронабивных скважин обустроить сплошную цементационную завесу по всей длине гребня плотины.

Расчёты и моделирование показывают, что плотина неустойчива (коэффициент устойчивости $F_s \leq 1$), при воздействии сейсмических нагрузок в том случае, если горизонтальная составляющая пикового ускорения грунта (ПУГ) при землетрясении превысит значение $ah=0.3g$, а вертикальная - $av=0.15g$ (рис. 5с). Указанные критические значения ПУГ основаны на оценке сейсмической опасности для рассматриваемого района КГЭС-2 для землетрясений с повторяемостью один раз в 475 лет. Согласно действующей карте сейсмического районирования территории Кыргызской Республики район Камбаратинского гидроузла относится к 9-бальной зоне землетрясений с магнитудой $M=7$.

Сочетание экстремальных гидрологических и опасных сейсмических событий маловероятно, хотя вероятность такого сценария не равна нулю, то есть теоретически такое сочетание возможно.

Выводы.

На основании результатов комплексных геофизических исследований и мониторинга состояния плотины КГЭС-2 с помощью компьютерной программы GOCAD создана трёхмерная геолого-геофизическая модель плотины. При построении этой модели на основе проектных (расчётных) геотехнических данных и полученных фактических распределений удельного электрического сопротивления наибольшее внимание было уделено выявлению характерных, однородных по геотехническим и геоэлектрическим свойствам слоёв в теле плотины, с уточнением конфигураций наиболее увлажнённых зон, что имеет первостепенное значение для гидрогеологического моделирования.

На основе калиброванной гидрогеологической модели и известных геомеханических свойств материалов, слагающих тело плотины были выполнены расчёты устойчивости плотины КГЭС-2 для различных сценариев, учитывающих разные уровни воды в водохранилище и различные сейсмические условия. Моделирование и

расчёты показали, что плотина неустойчива (коэффициент устойчивости $F_s \leq 1$), при воздействии сейсмических нагрузок в том случае, если горизонтальная составляющая пикового ускорения грунта (ПУГ) при землетрясении превысит значение $ah=0.3g$, а вертикальная - $av=0.15g$.

В связи с тем, что по данным микросейсмических наблюдений отмечается усиление сейсмических колебаний в насыпной части плотины, рекомендуется проводить внеочередной цикл геодезической съёмки и геофизического мониторинга тела плотины и её бортовых примыканий после сильных землетрясений (с магнитудой $M>5.0$) в ближней зоне (в радиусе 50 км от плотины). Для снижения неблагоприятного воздействия фильтрационного потока на устойчивость низового откоса плотины по нашей рекомендации была обустроена сплошная цементационная завеса по всей длине гребня плотины КГЭС-2.

В качестве общего вывода отметим следующее: исследование физического состояния гидротехнических сооружений является одной из актуальных задач и позволяет выявить области возможного нарушения целостности плотин и повышенной фильтрации вод, что способствует обеспечению безопасности их эксплуатации. В настоящее время для этой цели всё более активно применяются продвинутое геофизические методы. Среди геофизических технологий одним из наиболее информативных является метод электрической резистивной томографии [2, 3, 4], позволяющий получать данные о широком наборе физических характеристик среды, отражающих степень разуплотненности грунтов, их влажности, а также интенсивности фильтрационных процессов. Для получения более достоверных и обоснованных результатов необходимо комплексирование геофизических методов и совершенствование технологии ведения полевых изысканий (съёмки) и интерпретации данных.

Рассмотренное исследование может быть рекомендовано в качестве примера не только для оценки состояния гидротехнических сооружений, но и для изучения крупных природных объектов: грандиозных оползней вблизи плотин [6], оползневых дамб [7], моренно-ледниковых плотин и дамб хвостохранилищ в криолитозоне [8].

Данная работа была доложена на Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности, надежности и безопасности гидротехнических сооружений» проведенная 22-23 мая 2018 года в г.Ташкенте и рекомендована к публикации в журнале "Irrigatsiya va melioratsiya".

№	References	Литература
1	Torgoev I.A., Khavenit Kh.B., Strom A.L. Vliyaniye krupnomasshtabnogo vzryva na opolzneopasnye sklony v rayone Kambaratinskoy GES-2 [Influence of a large-scale explosion on landslide-prone slopes in the Kambaratinskaya HPP-2 area]. Materialy V Mezhdunarodnogo simpoziuma Sovremennye problem geodinamiki i geologii vnutrikontinental'nykh orogenov. g.Bishkek, 19-24 July, 2011. Vol.1. pp.195-201.	Торгоев И.А., Хавенит Х.Б., Стром А.Л. Влияние крупномасштабного взрыва на оползнеопасные склоны в районе Камбаратинской ГЭС-2 // Материалы V Международного симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». -г. Бишкек 19-24 июня 2011 г., том 1. – С. 195-201.
2	Torgoev I.A., Zhancharov Zh.U., Aydaraliev B. i dr. Geofizicheskiy monitoring plotiny Kambaratinskoy GES-2 [Geophysical monitoring of the dam at Kambaratinskaya HPP-2]. Vestnik KGUSTA, 2012, no.3(37). pp.262-268.	Торгоев И.А., Жанчаров Ж.У., Айдаралиев Б., и др. Геофизический мониторинг плотины Камбаратинской ГЭС-2 // Вестник КГУСТА, 2012, №3(37). - С. 262-268.

3	Torgoev I.A., Aydaraliev B., Omorov B., Torgoev A.D. Monitoring sostoyaniya vzryvnonabrosnoy plotiny Kambaratinskoy GES-2 [Monitoring of the state of the explosion dam of Kambaratinskaya HPP-2]. <i>Sovremennye problemy mekhaniki sploshnykh sred: Vyp.17. Gidrogazodinamika, geomekhanika i geotekhnologii.</i> Bishkek, 2013. pp.194-209.	Торгоев И.А., Айдаралиев Б., Оморов Б., Торгоев А.Д. Мониторинг состояния взрывонабросной плотины Камбаратинской ГЭС-2 // <i>Современные проблемы механики сплошных сред: Вып.17: Гидрогазодинамика, геомеханика и геотехнологии.</i> -Бишкек:2013. - С. 194-209.
4	Torgoev I., Havenith H.B., Torgoev A. Geophysical monitoring of artificial landslide dam of Kambarata Hydro Power Plant-2 (Kyrgyzstan). <i>Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Vol.3: Targeted Lanslides.</i> Springer, 2014. pp.641-647.	Torgoev I., Havenith H.B., Torgoev A. Geophysical monitoring of artificial landslide dam of Kambarata Hydro Power Plant -2 (Kyrgyzstan). // <i>Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Vol.3: Targeted Lanslides.</i> Springer, 2014.– pp. 641-647.
5	Havenith H.-B.,Torgoev I., Torgoev A., Strom A., Xu Y. and Fernandez-Steegeer T. The Kambarata 2 blast-fill dam, Kyrgyz Republic: blast event, geophysical monitoring and dam structure modelling. <i>Geoenvironmental Disasters (2015) 2:11.</i>	Havenith H.-B.,Torgoev I., Torgoev A., Strom A., Xu Y. and Fernandez-Steegeer T. The Kambarata 2 blast-fill dam, Kyrgyz Republic: blast event, geophysical monitoring and dam structure modelling. // <i>Geoenvironmental Disasters (2015) 2:11</i>
6	Torgoev I., Havenith H.B., Torgoev A., Cerfontaine P. and Ischuk A. Geophysical investigation of the landslide-prone slope downstream from the Rogun Dam construction site (Tajikistan). Mikos M., Casagli N., Yueping Yin and Sassa K. (Eds.) <i>Advancing Culture of Living with Landslides. Vol.4 Diversity of Landslide Forms.</i> 2017 pp.75-84.	Torgoev I., Havenith H.B., Torgoev A., Cerfontaine P. and Ischuk A. Geophysical investigation of the landslide-prone slope downstream from the Rogun Dam construction site (Tajikistan) // Mikos M., Casagli N., Yueping Yin and Sassa K. (Eds.) <i>Advancing Culture of Living with Landslides - Vol. 4 Diversity of Landslide Forms.</i> 2017 –pp 75-84.
7	Torgoev I.A., Khavenit Kh.B., Erokhin S.A. Otsenka selevogo riska pri vozmozhnom proryve zaval'nogo ozera AkKyol [Assessment of mudflow risk in the event of a possible breakthrough in the AkKul lake]. <i>Kyrgyzstan. GeoRisk, 2012, no.4.</i> pp.12-19.	Торгоев И.А., Хавенит Х.Б., Ерохин С.А. Оценка селевого риска при возможном прорыве завального озера АкКель (Кыргызстан) // <i>ГеоРиск, 2012, №4.</i> – С.12-19.
8	Alyoshin Yu.G., Torgoev I.A. Evolyutsiya tekhnoprirodnikh riskov na vysokogornyykh rudnikakh Kyrgyzstana [Evolution of techno-natural risks in high-mountainous mines in Kyrgyzstan]. <i>Nedropol'zovanie XXI vek. no.6, 2016.</i> pp.140-147.	Алёшин Ю.Г., Торгоев И.А. Эволюция техноприродных рисков на высокогорных рудниках Кыргызстана // <i>«Недропользование XXI век», №6, 2016.</i> – С. 140-147.