

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ВЗРЫВО-НАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ КАМБАРАТИНСКОЙ ГЭС-2

Торгоев И.А., Айдаралиев Б., Оморев Б., Торгоев А.

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

Введение. Одним из ключевых этапов строительства Камбаратинской ГЭС-2 (КГЭС-2) стало возведение плотины, которая перекрыла русло р. Нарын и направила потоки воды через гидроагрегаты станции для выработки электроэнергии. Причём для сооружения данной плотины специалистами Российского ООО «Гидроспецпроект» был применён не общепринятый, а взрыво-набросной метод строительства: с помощью крупномасштабного массового взрыва (КМВ) 2860 тонн взрывчатого вещества был произведён сброс горного массива правого борта в каньонообразное русло реки /1/.

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 (рис.1), что потребовало досыпки плотины до проектной отметки гребня 961 м обычным способом. Из-за того, что при КМВ не были достигнуты проектные размеры плотины, не было обеспечено и динамическое уплотнение горных пород и грунта в теле получившегося нава-

ла /2-3/. В результате уже через 12 часов после перекрытия русла на низовом откосе плотины были зафиксированы первые выходы фильтрационного потока из водохранилища. Спустя 18 часов после взрыва расход фильтрационного потока достиг 8-9 м³/с (рис. 1) при установившемся перепаде уровней воды между верхним и нижним бьефами свыше 35 м.

В настоящее время взрыво-набросная плотина КГЭС-2 (рис.2) представляет собой неоднородную скальную горную массу из песчаников, алевролитов и аргиллитов Q₂₋₃, раздробленную и перемещенную с помощью взрыва в каньон р. Нарын (рис.1). Основные характеристики плотины следующие: класс капитальности – II; высота – 60 м; отметка гребня - 961,0 м; длина по гребню – 230,5 м; в основании - 444,5 м; заложение верхового откоса 1:2,5; низового – 1:2,5; максимальный напор на плотину – 51,8 м, минимальный - 48,3 м /2/.

Учитывая уникальность плотины КГЭС-2, возведённой с помощью крупномасштабного взрыва, был организован мониторинг за состоянием плотины. В настоящее время специалистами ПИИ «Гидропроект» ведётся геодезический контроль деформаций (осадок) плотины по поверхностным маркам и регулярные наблюдения за фильтрационным режимом в теле и основании плотины с помощью наблюдательных скважин, пробуренных до подошвы зоны взаимодействия основания и плотины КГЭС-2.



Рис. 1. Проектный (пунктирная линия) и фактический (кёмная линия) контур плотины КГЭС-2 после перекрытия р. Нарын с помощью КМВ

Для регулярного слежения за режимом фильтрации в теле, основании и бортовых примыканиях плотины КГЭС-2 в июле 2012 г. специалистами НИЦ «Геоприбор» были начаты геофизические исследования и мониторинг, как самой плотины, так и прилегающих массивов горных пород. Эти исследования стали начальными этапами режимного мониторинга для оценки долговременной устойчивости основных сооружений КГЭС-2.

Необходимость подобного мониторинга обусловлена не только описанными выше неудовлетворительными результатами взрыво-набросного способа возведения плотины, но и особенностями сейсмо-тектонических условий на участке её створа, характеризующимися наличием в дне реки тектонического разлома «Южный», по которому фиксируются современные движения с амплитудой 3,5 м /1/. Следует также иметь в виду, что район основных сооружений КГЭС-2 характеризуется повышенной сейсмической активностью. Согласно, действующей карты Сейсмического районирования территории Кыргызской Республики, утверждённой в апреле 2012 г., район Камбаратинского гидроузла относится к 9-бальной зоне землетрясений с магнитудой $M=7,5$. Так, эпицентр Суусамырского землетрясения 1992 г. ($M=7,3$) располагался на расстоянии около 60 км к север-северо-востоку от плотины КГЭС-2 /3/.

Для оценки и мониторинга состояния плотины КГЭС-2 использовались следующие геофизические методы: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) в варианте электрического профилирования по методу сопротивлений (рис.2) и исследования сейсмических характеристик грунтов плотины по методу Накамуры. Геодезическая съёмка пунктов ВЭЗ и микросейсмических измерений осуществлялась с помощью дифференциальной системы DGPS ProMark-3. Для контроля фильтрационных процессов в теле плотины в 2010 г. были обустроены наблюдательные скважины (рис.2).

Результаты электропрофилирования и комплексного мониторинга.

На рис. 2 представлена карта-схема расположения профилей ВЭЗ и наблюдательных скважин на исследуемом участке плотины и её бортовых примыканий. Результаты электрического профилирования по всем профилям, показанным на рис.2, демонстрируются в виде двумерных геоэлектрических разрезов (геоэлектротомограмм), представленных на рис. 3-4 совместно с геологическими разрезами плотины и графическими результатами колебаний уровня воды в верхнем бьефе (УВБ) и уровнями воды в наблюдательных скважинах (УВС).

Как видно на рисунках 3-4, геоэлектротомограммы по всем профилям характеризуется существенной мозаичностью (неоднородностью) распределения значений удельных электрических сопротивлений (УЭС). На геоэлектрических разрезах видно, что значения УЭС пород и грунтов, слагающих тело плотины, изменяются в широком интервале

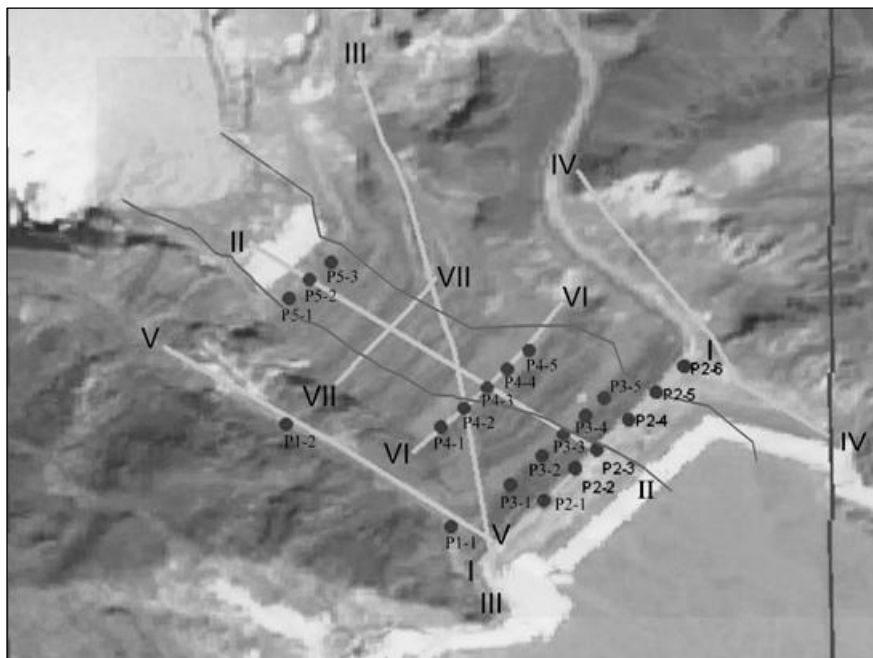


Рис. 2. Расположение профилей ВЭЗ (светлые линии) и наблюдательных скважин (е кружки) на космоснимке плотины КГЭС-2. Тонкими тёмными линиями показаны контуры русла р. Нарын до взрыва.

значений от единиц до десятков тысяч Ом·м. Столь значительный диапазон изменения УЭС, очевидно, связан с неоднородностью тела

плотины по своим геотехническим и фильтрационным свойствам. Низкие значения УЭС в диапазоне 10-100 Ом·м соответствуют сильно водонасыщенным породам и грунтам различного состава, обладающим высокой электропроводностью. Неводонасыщенные породы характеризуются повышенными значениями УЭС свыше 1000 Ом·м.

Геоэлектрический разрез I-I по гребню плотины. На разрезе I-I (рис.3б,в) в его верхней части между 60 и 90 погонными метрами (ПМ) профиля в интервале высотных отметок 935-945 м отчётливо выделяются две зоны шириной 8-9 м с наименьшими значениями УЭС. Эти зоны повышенной проводимости (низкого сопротивления), через которые пробурены наблюдательные скважины 2.1 и 2.2, интерпретируются нами как зоны повышенного увлажнения типа фильтрационных потоков. Наиболее чётко эти увлажнённые зоны выделяются на верхней томограмме рис. 3б, полученной в период максимального наполнения водохранилища (УВБ), то есть наибольшего напора в июле 2012 г. Из разреза I-I на рис 3.б видно, что эти водонасыщенные зоны находятся в верхней части плотины, отсыпанной поверх навала скальными породами (камнем) из воронки взрыва, то есть целиком располагаются в отсыпанной традиционным способом верхней части плотины. Повышенная влагонасыщенность этих зон скорее всего объясняется повышенной водопроницаемостью насыпи из камня (рис.3а), сформированной после КМВ. На продольном профиле II-II (рис.4б) эта зона увлажнения в виде фильтрационного потока отчётливо прослеживается между скважинами 2.3 и 4.3 при максимальном уровне воды в водохранилище КГЭС-2.

Следует отметить, что описываемые зоны увлажнения в районе скважин 2.1 и 2.2 пространственно совпадают с зоной просадок и трещин, возникших на гребне плотины в ноябре 2011 г. Необходимо также обратить внимание на то, что в створе этих зон на гребне плотины пока отсутствуют буронабивные скважины цементационной завесы, имею-

щиеся на фланговых участках гребня. По этой причине при максимальном уровне воды в верхнем бьефе в центральной части гребня имеет место просачивание воды в тело плотины в обход буронабивных скважин.

В верхней части плотины, в зоне её примыкания к левому борту долины (рис. 3б,в) просматривается ещё одна относительно небольшая зона увлажнения, в районе пересечения профиля I-I с профилем III-III на отметке ниже 930 м. Скорее всего эта зона увлажнения связана с обходной фильтрацией по левобережному примыканию плотины. В пользу этого утверждения свидетельствует, во-первых, синхронный характер изменения УБВ и уровня воды в ближайшей к этой зоне скважине №1.1. Во-вторых, факт наличия обходной фильтрации по левому борту долины подтверждается результатами электрозондирования по профилю V-V.

На поперечном геоэлектрическом разрезе I-I при максимальном УБВ (рис.3б) на отметках ниже 900 м в теле плотины выделяется ещё одна зона сильного водонасыщения, приуроченная к аллювиальным отложениям донной части каньона р. Нарын, то есть связанная с фильтрационным потоком, существующим в основании плотины. Выше отмечалось, что мощность аллювиальных отложений в основании плотины, представленных галечником, достигает 10-12 м, а коэффициент фильтрации $K_{\phi}=0,1$ см/с (100 м/сут).

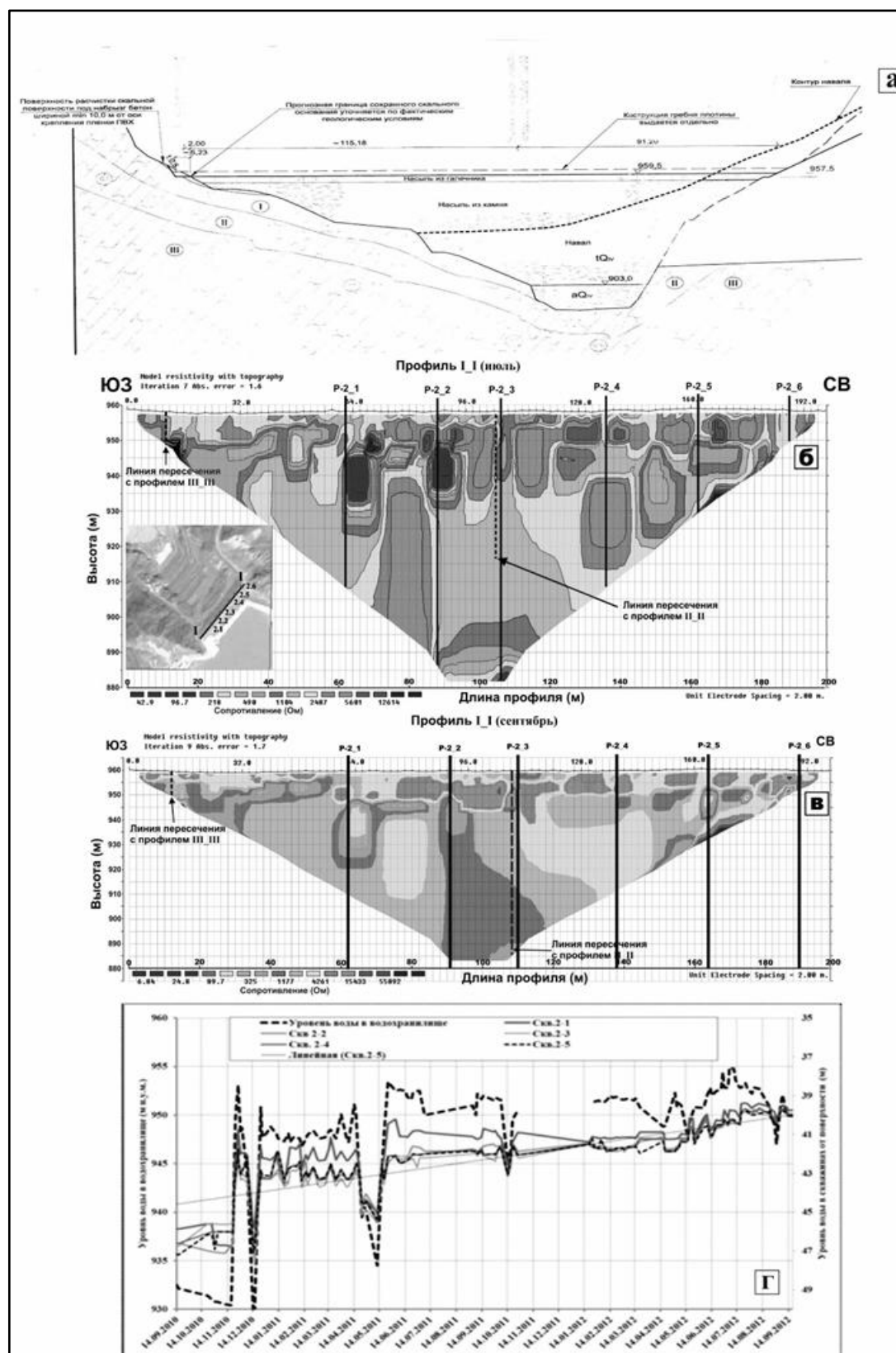


Рис.3. а) Геологический разрез и геотомограммы сопротивлений по профилю I-I в створе скважин 2.1-2.6 по состоянию в начале июля 2012 г.(б) и в конце сентября 2012 г.(в). На врезке томограммы бб показано положение профиля и скважин на гребне плотины. г) результаты наблюдений УВБ и УВС.

На рис. 3г в графическом виде представлены результаты наблюдений за изменениями во времени УВБ и УВС в скважинах 2.1-2.5, пробуренных на гребне плотины. Эти скважины расположены наиболее близко к верхнему бьефу. По этой причине уровень воды в скважинах этого пьезометрического створа тесно связан с изменениями УВБ и кроме того результаты наблюдений в скважинах 2.1-2.5 должны в первую очередь отражать эффект естественной кольматации по сравнению со скважинами нижних пьезометрических створов. При сопоставительном анализе изменения УВБ и УВС видно, что с начала режимных наблюдений 14 сентября 2010 г. и до начала 2012г. уровень воды во всех наблюдательных скважинах изменялся практически синхронно с уровнем воды в водохранилище КГЭС-2. В особенности, эта синхронность отчётливо проявляется в периоды резкой сработки и быстрого наполнения водохранилища с большими перепадами УВБ в интервале отметок 930-950 м, имевших место в следующие календарные сроки: 18 ноября-23 декабря 2010 г.; 14 апреля-24 мая 2011г.; 4-26 октября 2011 г. С начала 2012 г. отмечается нарушение синхронности изменений УВБ и УВС практически по всем наблюдательным скважинам этого створа вплоть до противофазного характера их изменения, особенно в периоды быстрого сезонного наполнения и сработки водохранилища КГЭС-2 в диапазоне отметок 950,0-955,0 м. При сопоставлении графиков изменения УВБ и УВС во времени видно то, что уровень воды в скважинах с начала 2012 г. уже слабее реагирует на изменение уровня воды в водохранилище. Это может свидетельствовать о начавшемся в теле плотины процессе постепенной кольматации, то есть естественного заполнения пор и пустот в теле плотины взвешенными и влекомыми наносами р. Нарын. При сравнении значений УВС в скважинах пьезометрического створа, который совпадает с геоэлектрическим разрезом I-I, видно, что наиболее высокий уровень воды наблюдается в скважине 2.1. Это объясня-

ется, во-первых тем, что скважина №2.1 пробурена через наиболее увлажнённую зону, приуроченную к 60-у погонному метру профиля I-I (рис.3 б,в). Во-вторых, к скважине 2.1 примыкает зона увлажнения, связанная с обходной фильтрацией левобережного примыкания плотины. Эта зона обходной фильтрации также отчётливо проявляется на створе скважин 3.1-3.5 в виде также повышенного УПВ в скважине 3.1, наиболее близко расположенной к левобережному примыканию плотины. Как видно на рис. 3г в долговременном аспекте отмечается устойчивая тенденция постепенного подъёма воды в пьезометрических скважинах на гребне плотины (створ скважин 2.1-2.5) скорее всего за счёт постепенной кольматации ядра плотины.

Геоэлектрический разрез II-II. При сопоставлении геоэлектротомограмм, полученных по продольной оси плотины II-II (рис 4б,в), с геологическим разрезом по этой же оси (рис.4а) хорошо видно, что зона увлажнения, проявляющаяся на геоэлектрическом разрезе I-I в виде двух фильтрационных потоков (рис.3б) ниже отметки 940 м, связана с просачиванием воды из верхнего бьефа. На рис. 4а наиболее вероятный путь просачивания воды показан стрелками. В сторону низового откоса и бермы на

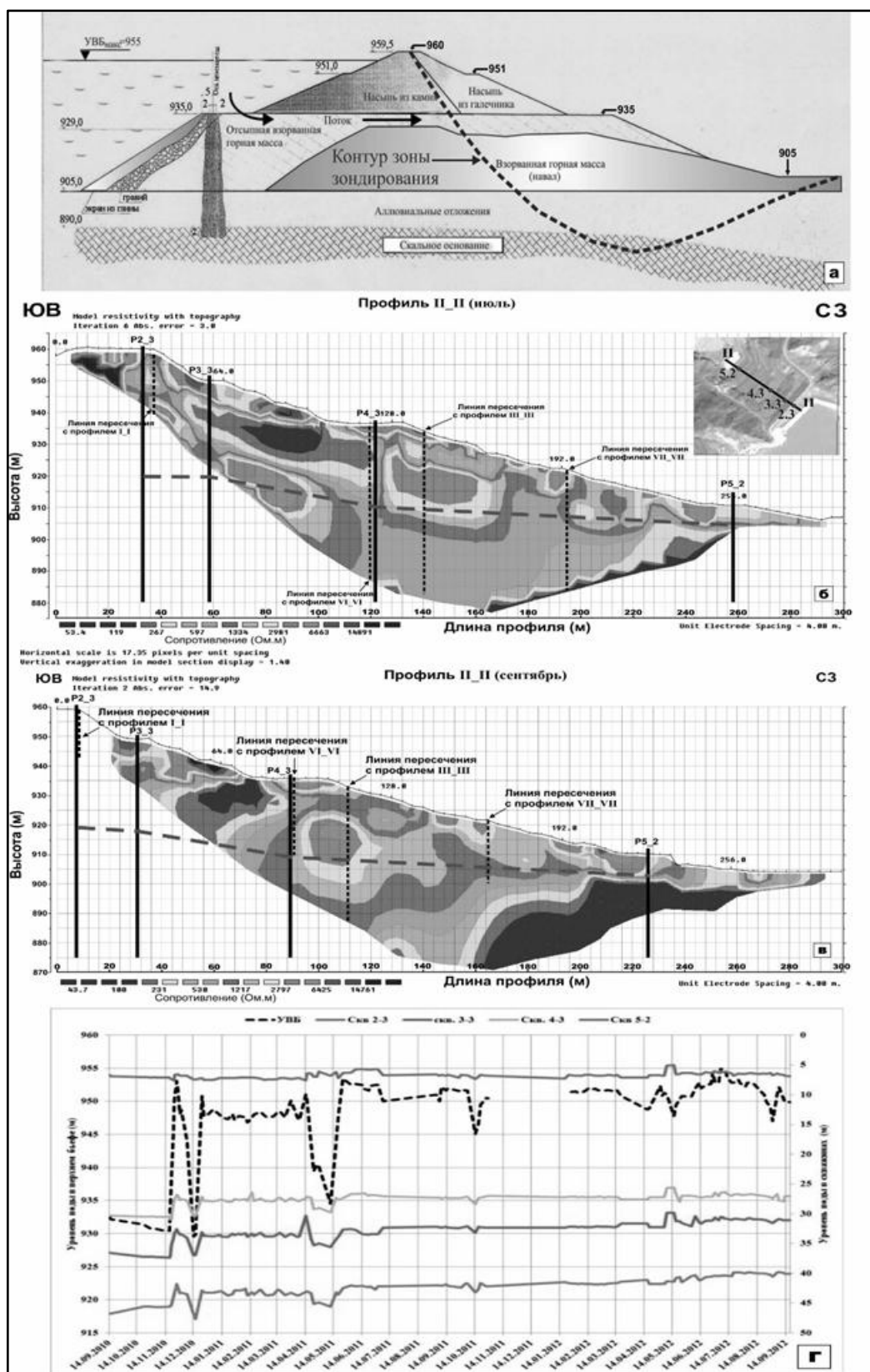


Рис.4. . Геологический разрез и геотомограммы сопротивлений по продольному профилю II-II в створе скважин 2.3-5.2 по состоянию в начале июля 2012 г.(б) и в конце сентября 2012 г.(в); г) результаты наблюдений УВБ и УВС. Серой пунктирной линией показано гипсо-

метрическое положение уровня воды в наблюдательных скважинах профиля в моменты проведения электрозондирования отметке 935 м вода просачивается через насыпь из камня поверх навала, сформированного при КМВ. При максимальном УВБ контур зоны увлажнения (рис 4б) вдоль оси плотины располагается между высотными отметками 945 и 920 м и между 50-120 ПМ профиля, то есть её протяжённость составляет свыше 70 м. В меженный период продольный размер зоны увлажнения, её протяжённость сокращается до 50 м (рис. 4в - интервал профиля 40-90 ПМ).

На обеих электротомограммах (рис. 4б,в) хорошо видно, что рассматриваемая зона увлажнения как бы имеет выход на поверхность низового откоса плотины на отметке 935 м, на второй сверху берме (полке), хотя явных внешних признаков высачивания воды здесь во время проведения режимного электрозондирования в июле и сентябре обнаружено не было. Вблизи этой зоны обустроена наблюдательная скважина 4.3. Результаты наблюдений по этой скважине (рис. 4г) свидетельствуют о том, что уровень воды в этой скважине на протяжении всего периода наблюдений остаётся постоянным, испытывая небольшие скачки синхронные с резкими перепадами УВБ в моменты резкой сработки водохранилища. Аналогичный характер изменения УВС имеет место и в скважине 5.2 профиля II-II, пробуренной у подошвы внешнего откоса плотины. Следует отметить, что все наблюдательные скважины (2.3, 3.3, 4.3 и 5.2) пьезометрического створа II-II оказались в пределах старого русла р. Нарын (рис 2). В скважине 3.3 и особенно в скважине 2.3 этого профиля прослеживается тенденция постепенного повышения уровня воды (рис 4г), что отчасти может быть связано с постепенной кольматацией ядра навала, сформированного при взрыве.

На геоэлектрических разрезах профилей II-II (рис.4б,в) обращает на себя внимание сильно увлажнённая зона у подошвы плотины со стороны нижнего бьефа. На рис. 4в видно, что эта зона распространяется внутрь тела плотины на значительное расстояние (до 160 ПМ) от уре-

за воды в нижнем бьефе. По-видимому, столь сильное значительное по протяжённости увлажнение низового откоса у подошвы плотины обусловлено совместным действием фильтрационных потоков, распространяющихся, в донной части каньона, в теле плотины и за счёт просачивания воды из нижнего бьефа. В этой связи необходимо отметить, что в период проведения первого цикла геофизической съёмки 4-9 июля 2012 г, когда отмечался максимум УВБ, при визуальном осмотре участка подошвы плотины между бетонными плитами на правом фланге наблюдались значительные по расходам потоки воды, стекающей в нижний бьеф. Как отмечалось выше, из-за неудачного КМВ не удалось достичь запроектированных размеров плотины как по высоте, объёму, так и по распластанности профиля плотины. Это стало причиной начавшегося перелива и фильтрации воды из верхнего бьефа практически сразу после КМВ. Дальнейшая отсыпка и формирование гребня плотины до отметки 961 м велась поверх этого потока, расход которого достигал 23 декабря 2009 г. 8-9 м³/с. По-видимому, влияние этого потока проявляется до настоящего времени в виде фильтрационного потока в теле плотины, который как бы унаследовал контуры и пространственное положение потока, возникшего после КМВ.

Таким образом, имеются основания утверждать, что одним из источников увлажнения грунтовой толщи плотины на отметках ниже 940 м между 50 и 120 м погонными метрами профиля II-II (рис. 4б) является поток, который возник в результате перелива воды из водохранилища поверх навала, сформированного сразу после крупномасштабного взрыва (рис.1).

Результаты микросейсмических наблюдений. При изучении сейсмических характеристик грунтов, слагающих тело плотины, использовался метод регистрации и анализа микросейсм, предложенный японским сейсмологом Накамурой. Микросейсмы, или сейсмический шум Земли

представляют собой непрерывные, весьма слабые колебания (микроколебания) земной поверхности в широком интервале амплитуд и частот. Для целей сейсмического микрорайонирования наибольший интерес представляют микросейсмы с периодами колебаний в интервале 0,1 – 2,0 сек (0,5 – 10 Гц). При реализации метода Накамуры на практике необходимо при регистрации микросейсм определить реакцию контролируемой точки на поверхностные колебания в виде квази-передаточной функции QST или отношения горизонтальной и вертикальной компонент колебаний на поверхности (H/V) в определенном диапазоне частот.

На рис. 5 представлены отношения горизонтальной H (север-юг) и вертикальной V компонент микросейсм. Усредненные значения отношения H/V показаны черной сплошной линией, а пунктирной линией показаны отношения H/V в пределах одного стандартного отклонения (G) от среднего H/V.

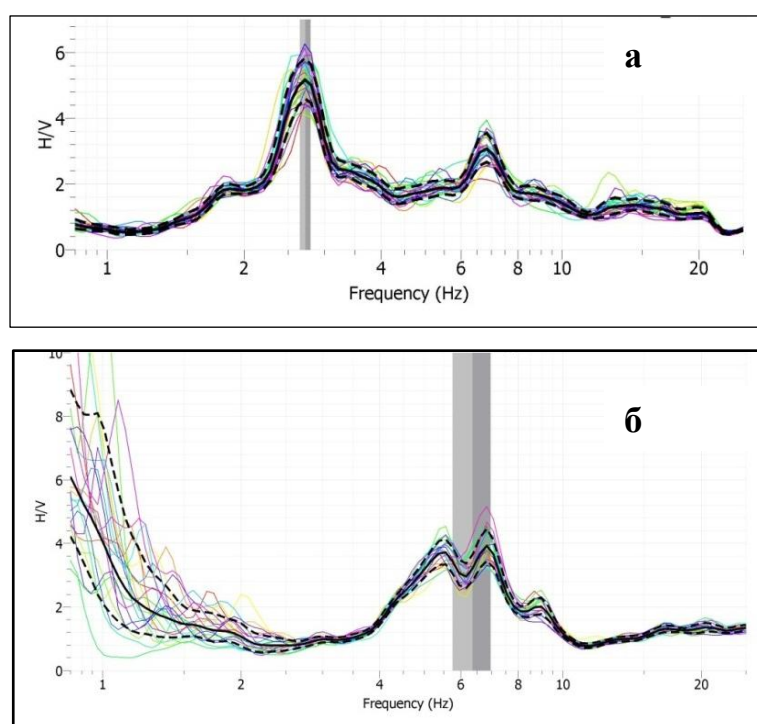


Рис. 5. H/V – спектры микросейсм на гребне плотины (а) и у её основания (б)

Результаты измерений микросейсмического шума по методу Накамуры показывают, что тело дамбы усиливает сейсмический сигнал в диапазоне 2-5 Гц, а фундаментальная частота f_0 насыпной дамбы составляет около 3 Гц (рис.5а). За пределами насыпной дамбы усиления сейсмических колебаний нет. На первой террасе, ниже гребня дамбы в створе скважин 3.1-3.4 наблюдается такая же резонансная частота ($f_0=2,7$ Гц). У основания дамбы, снизу, наблюдается усиление вблизи частоты 6 Гц (рис. 5б), что по методике расчёта Накамуры даёт мощность насыпной дамбы в 20 м.

Заключение. 1. С помощью вертикального электрического зондирования в теле плотины Камбаратинской ГЭС-2 в результате первых двух циклов геофизической съёмки в июле и сентябре 2012 г., а также на основе анализа данных пьезометрических наблюдений выявлены фильтрационные потоки следующего происхождения:

- фильтрационный поток №1 с поперечным сечением около 8 м, формирующийся примерно левее центральной продольной оси плотины и правее ряда буронабивных скважин цементационной завесы левого фланга, проявляющийся в виде двух фильтрационных окон на гребне плотины
- обходной фильтрационный поток №2 представляющий собой часть водного потока, обтекающего левобережное примыкание плотины и выходящего в низовой откос плотины через трещиноватый береговой склон левого борта долины р. Нарын.
- фильтрационный поток №3 в основании плотины, приуроченный к аллювиальным отложениям донной части р. Нарын.
- фильтрационный поток №4 в подошву низового откоса плотины со стороны нижнего бьефа.

2. Результаты анализа изменения уровней воды в наблюдательных скважинах (УВС) и их взаимосвязи с колебаниями уровня воды в верхнем бьефе (УВБ) свидетельствуют о том, с начала режимных пьезо-

метрических наблюдений в сентябре 2010 г. и примерно до начала 2012 г. уровень воды во всех наблюдательных скважинах изменялся практически синхронно с уровнем воды в водохранилище. Особенно чётко эта синхронность проявлялась в периоды резкой сработки и наполнения водохранилища. С начала 2012 г. отмечается нарушение синхронности изменений УВС и УВБ, вплоть до противофазного характера их изменения в периоды резкой сработки водохранилища КГЭС-2.

3. При анализе характера изменения УВС в скважинах пьезометрического створа 2.1-2.5 и скважине №3.1 во времени отчётливо прослеживается тенденция постепенного повышения уровня воды во всех перечисленных скважинах, наиболее близко расположенных к верхнему бьефу. Причём при анализе взаимосвязи УВБ и УВС во времени выявлено, что уровень воды в этих скважинах с начала 2012 г. уже слабее реагирует на колебания УВБ. Совокупность отмеченных особенностей характера изменения УВБ в скважинах №3.1 и №№ 2.1-2.5 может свидетельствовать о постепенной кольматации ядра плотины.

4. В связи с тем, что по данным микросейсмических наблюдений отмечается усиление сейсмических колебаний в насыпной части плотины, рекомендуется проводить внеочередной цикл геодезической съёмки и геофизических исследований тела плотины после сильных землетрясений (с магнитудой $M > 5,0$) в ближней зоне (в радиусе 50 км от плотины).

5. Для повышения эффективности цементационной завесы и снижения неблагоприятного воздействия фильтрационного потока №1 на устойчивость низового откоса плотины рекомендуется с помощью буронабивных скважин обустроить сплошную цементационную завесу по всей длине гребня плотины.

6. Наряду с продолжением мониторинга состояния тела и бортов плотины рекомендуется выполнить контрольные оценки её устойчивости с учётом фактического положения кривой депрессии и сейсмики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корчевский В.Ф., Обополь А.Ю. Камбаратинская ГЭС-2 на р. Нарын в Кыргызской Республике. Актуализация проекта. Сводная пояснительная записка. ООО СПИИ «Гидроспецпроект» - Москва, 2008 - 134 с.
2. 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. - стр. 195-201
3. Торгоев И.А., Айтматов И.Т., Алёшин Ю.Г. Реакция оползней и слабоустойчивых склонов на крупномасштабный взрыв в районе Камбаратинской ГЭС-2 // Современные проблемы механики сплошных сред. Вып. 13. / Сборник трудов Международной конференции «Проблемы геомеханики и освоения недр» Бишкек, 2011. - с.128-138