

УДК 556.626/627

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ГЕОТЕХНИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ ЗАГОРСКОЙ ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

© 2008 И.В. Осика

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, 123995; e-mail: irvikos@gmail.com*

В статье рассмотрены результаты режимных наблюдений, применяемых на Загорской ГАЭС для слежения за состоянием склона напорных трубопроводов. Приведены результаты совместной обработки данных наклономерных измерений и квазипериодических изменений уровня воды в верхнем бассейне для Загорской ГАЭС. Отражены другие возможности применения наклономерных данных. Метод опробован для крупных гидротехнических сооружений, а также может найти применение для мониторинга устойчивости больших территорий в сейсмоопасных зонах.

*Ключевые слова:* ГАЭС, комплексная обработка, наклономерные работы, компьютерное моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

По мере развития энергетики на основе тепловых, а затем и атомных электростанций, и в связи с исчерпанием гидроэнергетических ресурсов в Европейской части России, стал ощущаться недостаток маневренных мощностей для регулирования графика и поддержания стандартной частоты. Недостаточная мощность маневренных электростанций обуславливает неэкономичный режим работы энергоблочного оборудования ГРЭС, ТЭС и АЭС. В этих условиях наметилось развитие энергетики по пути ввода высокоэкономичных базисных и специальных пиковых электростанций. Видимые изменения в структуре энергопотребления придали актуальность вопросам создания гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС). В настоящее время в России существуют всего 2 действующие ГАЭС: маломощная Ставропольская ГАЭС (15.9/19.2 МВт-турбинный/насосный режимы) и Загорская ГАЭС (1200/1320 МВт-турбинный/насосный режимы).

Гидротехнические системы являются объектами повышенной опасности, в связи с чем на них организуется серьезная сеть геотехнического мониторинга, назначение которой — своевременное обнаружение деструктивных процессов в системе. Существенным недостатком применяемых методов инструментального контроля (изменений уровней воды по скважинам, гори-

зонтальных и вертикальных смещений в точках, опасных наклонов конструкций и др.) является их обособленная обработка и анализ (Любушин, 2007).

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследований — Загорская ГАЭС, расположенная в Сергиев Посадском районе Московской области (рис. 1). Основная особенность Загорской ГАЭС — ежесуточное перемещение 22.7 млн. м<sup>3</sup> воды из нижнего бассейна в верхний (режим насоса) или из верхнего бассейна в нижний (режим генератора). Перепад высот между верхним и нижним бассейном составляет 100 м, занимаемая ГАЭС площадь порядка 25 км<sup>2</sup>. Объект возведен на нескальном основании, сложенном преимущественно рыхлыми породами четвертичного возраста и коренными породами мелового возраста.

На Загорской ГАЭС действует сеть геотехнического мониторинга. Особое внимание уделяется склону напорных трубопроводов, как наиболее опасному, с точки зрения устойчивости, участку (Юдкевич, 2000). Осуществляются: пьезометрические измерения, наблюдения по обратным отвесам, высокоточные спутниковые координатные определения, визуальные и флористические наблюдения, сейсмометрические работы и др. Для слежения за опасными отклонениями и деформациями в здании водоприемника, рас-

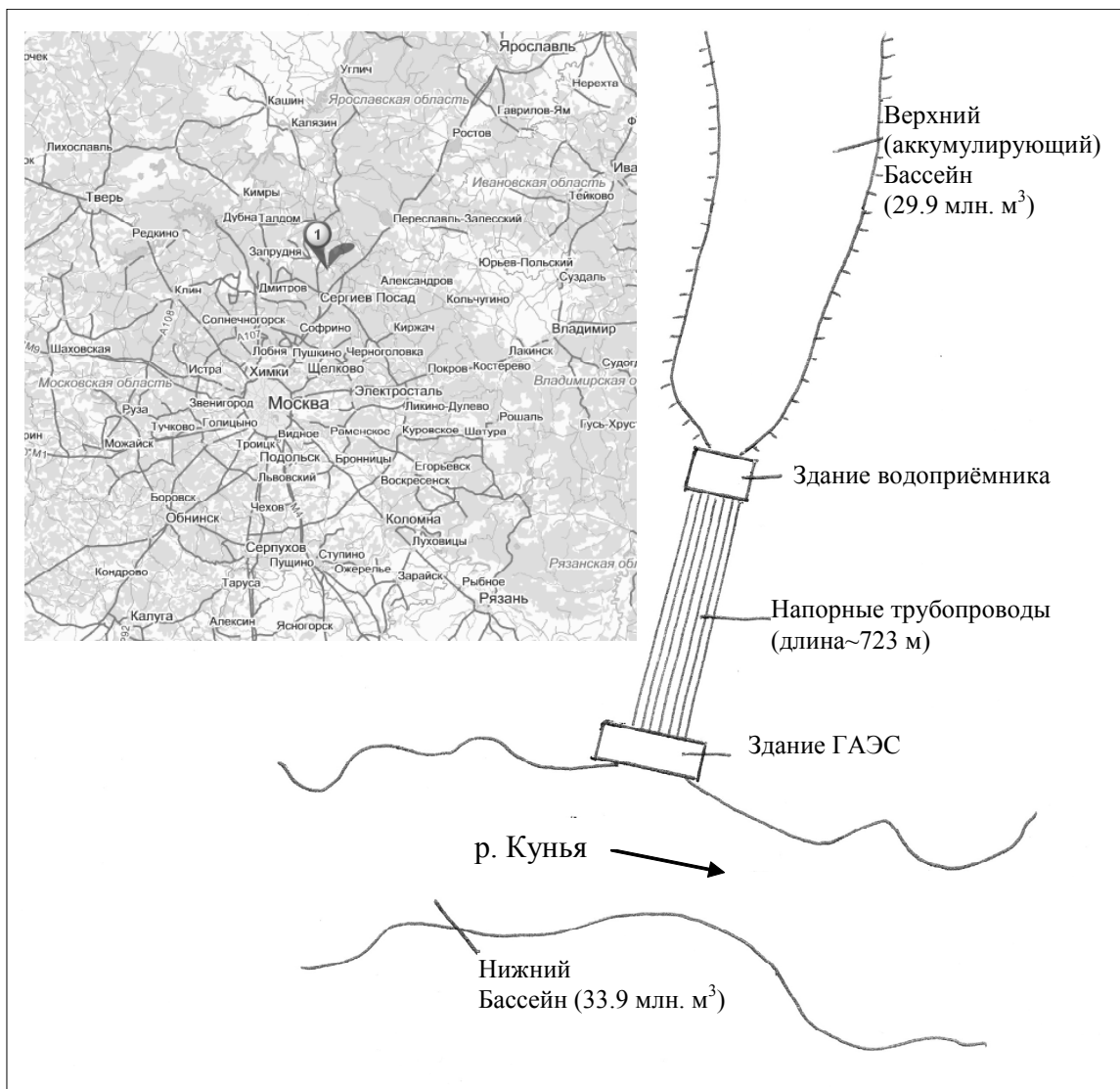


Рис. 1. Ситуативный план и схема расположения основных сооружений Загорской гидроаккумулирующей электростанции. 1 – Загорская ГАЭС.

положенного практически на бровке склона, установлены наклонометры и деформографы.

Пьезометрические наблюдения в скважинах, пробуренных на разные горизонты, позволяют изучать динамику изменения уровней подземных вод и предпринимать меры по регулированию водных потоков и их перераспределению в грунтовом массиве.

Наблюдения за показаниями обратных отвесов позволяют фиксировать горизонтальные смещения в характерных точках, а также измерять наклоны плиты (при расположении обратных отвесов в группе на единой плите основания). Переход на автоматизированные датчики позволил существенно повысить эффективность мониторинга в части частоты опроса датчиков, времени определения параметров, существенно облегчил обработку данных.

Высокоточные спутниковые методы координатных определений в настоящее время являют-

ся наиболее информативными для отслеживания деформаций, проседаний и оползней земной поверхности. Сравнивая данные нескольких циклов наблюдений на геодинамическом полигоне Загорской ГАЭС можно наблюдать тенденцию изменения морфологии поверхности. Для склона напорных трубопроводов Загорской ГАЭС наблюдаются ощутимые просадки на уровне 1–2 см в год, результирующий вектор горизонтальных смещений по отдельным пунктам оценивается в 15–18 мм (Генике и др., 2007<sup>1</sup>).

Флористические наблюдения позволяют выделять увлажненные участки поверхностного слоя грунтового массива. Качественно и количе-

<sup>1</sup> Генике А.А. и др. Геодинамический мониторинг гидротехнических сооружений Загорской ГАЭС с использованием высокоточных спутниковых наблюдений: Технический отчет за 2007г. М., 2007. 51 с. Техархив Загорской ГАЭС, инв. №439.

ственно фиксировать параметры возникающих дефектов помогают визуальные наблюдения.

Сейсмометрические наблюдения направлены на измерения возбуждаемых сейсмических колебаний на территории станции, вызываемых работой гидроагрегатов. Результаты позволили выявить направления максимальных и минимальных вибрационных воздействий: при всех режимах работы агрегатов минимальное вибрационное воздействие для южного склона и для здания водоприемника происходит по координате  $Z$  (по вертикали), кроме самых нижних ярусов склона. Количественно оценено вибрационное воздействие в разных режимах эксплуатации ГАЭС: регистрируемые колебания в 2-4 раза выше при насосном режиме. Частота, при которых колебания грунтов наиболее интенсивны, составляет 2.5 Гц. Установлена зависимость увеличения вибраций от количества работающих агрегатов; определено, что колебания группируются возле основной частоты, определяемой частотой вращения агрегатов, и 1-ой гармоники; найдены основные частоты колебаний при работе в генераторном режиме, равные 2.5 Гц, 5 Гц и 7.5 Гц (Осика и др., 2004<sup>2</sup>). К сожалению, сейсмометрические наблюдения в связи с особенностями строения верхней части геологического разреза не дают возможности регистрировать поперечные волны, а, следовательно, получать информацию об изменениях модулей сдвига грунтов.

Наклономерно-деформометрические наблюдения на водоприемнике Загорской ГАЭС применяются для получения оперативной информации об опасных наклонах и деформациях сооружения. Аппаратура размещена на левом и правом устоях (относительно направления потока) и на напорной грани (рис. 2). Наклономерно-деформометрические измерения позволяют получать данные с точностью 1 мкм и 0.1 угл. с, шагом от первых минут и обладают большими возможностями интерпретации в зависимости от мест установки аппаратуры. Наклоны левого и правого устоев водоприемника на отметке «0 м» (рис. 3) отражают поведение грунтового массива в условиях работы Загорской ГАЭС. Видна синхронность изменений уровня воды и наклонов, нет запаздывания, прописываются локальные отклонения от графика. На отметке «16.7 м» (рис. 4) виден эффект наложения изгибных деформаций на поведение конструкции под давлением воды в верхнем бассейне (Молоденский и др., 2006; Осика, 2006).

<sup>2</sup> Осика В.И. и др. Оценка влияния работы гидроагрегатов на динамическую неустойчивость склонов и водоприемника. Технический отчет. М., 2004. 14 с. Техархив Загорской ГАЭС, инв. №380 (8-14).

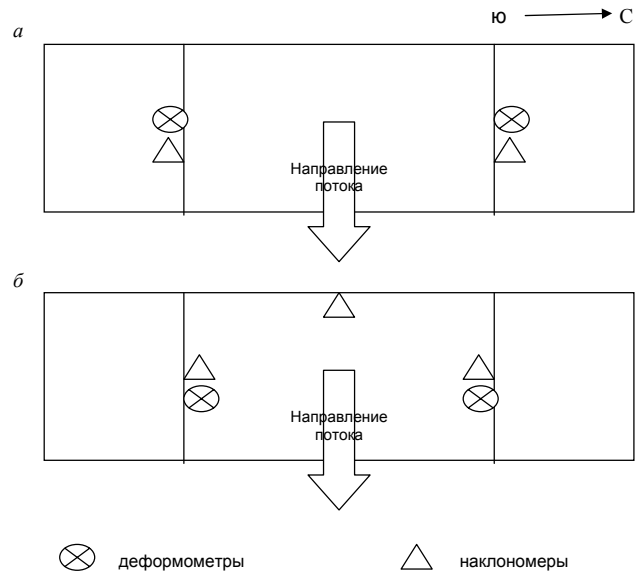


Рис. 2. Схема размещения наклономеров и деформометров в здании водоприёмника: а – на отметке «0 м»; б – на отметке «16.7 м».

Возможность измерять наклоны поверхности грунтового массива от образующейся воронки проседания (на отметке «0 м») и наличие зондирующего сигнала позволили рассчитать модуль упругости в реальном массиве грунта и применить компьютерное моделирование для возможного обнаружения локальных аномалий изменения модулей сдвига.

Математическое моделирование отклика среды на изменяющиеся во времени нагрузки от колебаний уровня бассейнов очень похоже на моделирование реакции Земли на воздействие нагрузок, возникающих из-за приливных колебаний уровня Мирового океана. В геофизике анализ приливных данных позволил получить весьма ценную информацию о механических свойствах среды в окрестностях пунктов наблюдений, а в некоторых случаях – и об изменении этих свойств со временем. Изменения уровней бассейнов не являются строго периодическими, как это имеет место для лунно-солнечных приливов, а деформации среды имеют локальный характер и не сопровождаются заметными колебаниями гравитационного поля.

В отличие от типичных геофизических задач, в рассматриваемой здесь задаче имеются достаточно детальные исходные данные о свойствах грунтов. Для Загорской ГАЭС было проведено компьютерное моделирование эффектов локальных изменений модулей сдвига на амплитуды суточных наклонов и деформаций среды. Использовался метод возмущений по малому параметру, равному отношению вариации модуля сдвига к его невозмущенным значениям, а также метод конечных разностей с последующим решением алгебраических систем высоких порядков мето-

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ГЕОТЕХНИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ

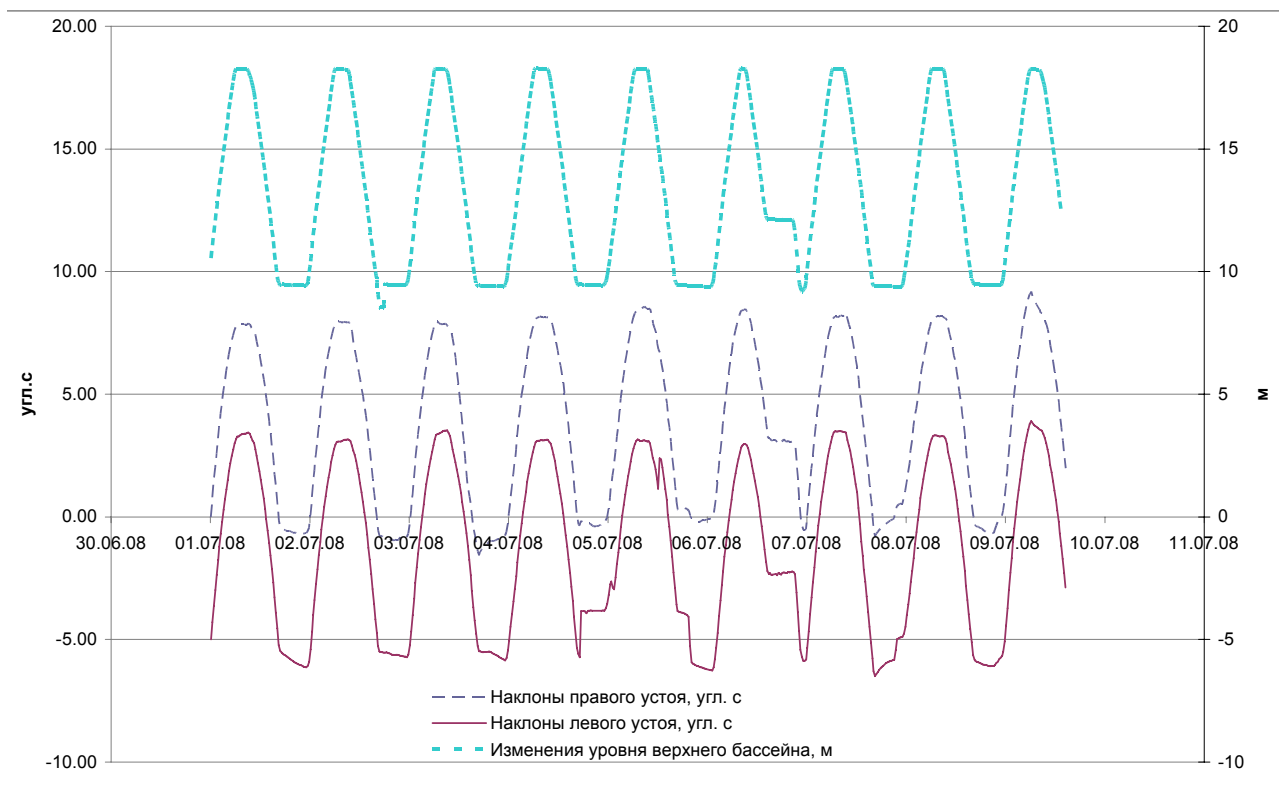


Рис. 3. Наклоны левого и правого устоев водоприёмника на отметке «0 м» и график изменения уровня воды в верхнем бассейне во времени.

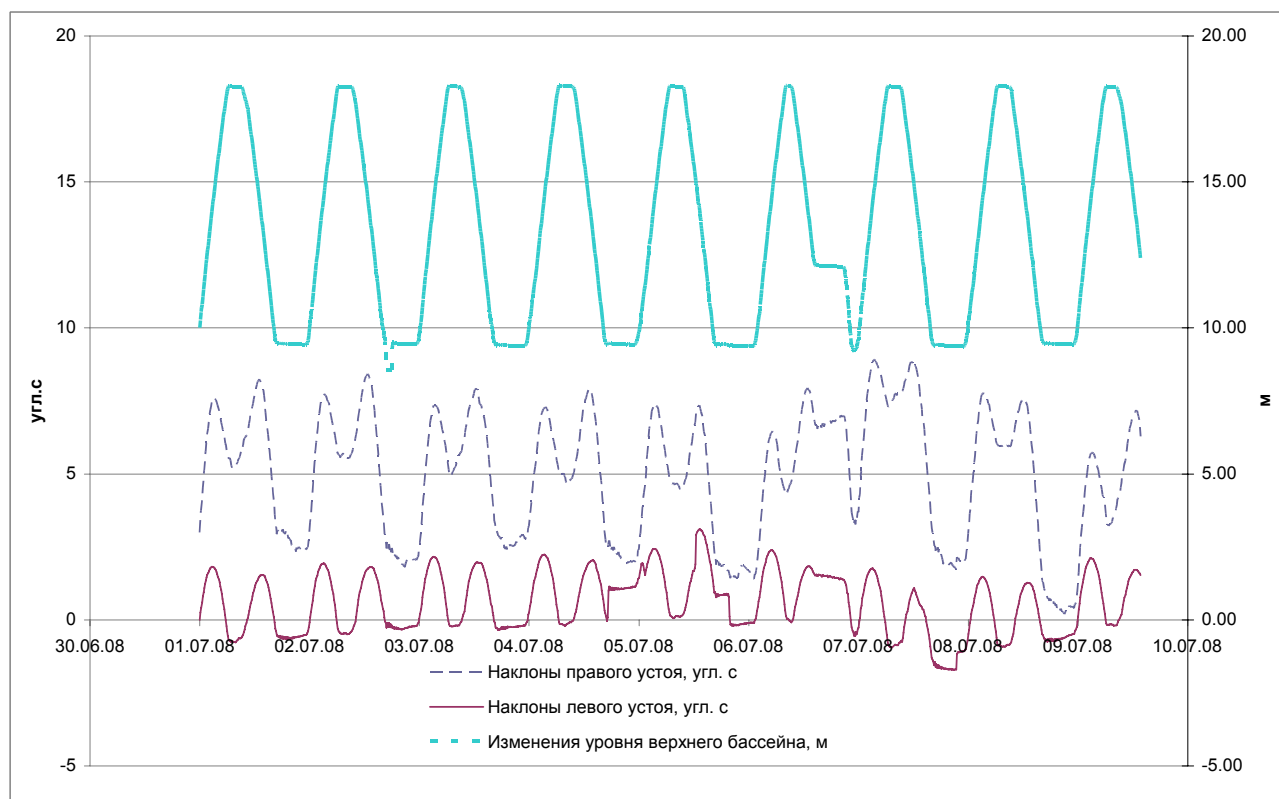


Рис. 4. Наклоны левого и правого устоев водоприёмника на отметке «16.7 м» и график изменения уровня воды в верхнем бассейне во времени.

дом Гаусса-Зейделя (Молоденский, 1983, 1984). Преимущество этого метода состоит в том, что с его помощью можно исследовать эффекты «мягких включений» и в тех случаях, когда отношение вариации модуля сдвига к его невозмущенным значениям не являются малыми.

Привлечение данных по изменениям пьезометрических уровней в скважинах, положения струн обратных отвесов, данных о рельефе участка, изменениях уровней в верхнем и нижнем бассейнах позволило получить компьютерную модель, объединяющую разнородные данные отдельных видов режимных наблюдений. Модель позволяет максимально точно описывать изменения в грунтовом массиве в свете получаемых от геотехнического мониторинга данных. Был обнаружен эффект «мягкого включения» в области нарушенного залегания пород и погребенных оползневых накоплений (Осика и др., 2006<sup>3</sup>) (рис. 5). На рисунке это отражается в изменении характера изолиний наклонов приповерхностной части геологической среды под действием квазипериодических нагрузок от перекачки воды из одного бассейна в другой. Анализ данных многолетних наблюдений на склоне напорных трубопроводов показал тесную связь между изменениями уровня подземных вод и смещений по обратным отвесам. Однако сезонные изменения смещений по обратным отвесам наблюдаются не повсеместно. В существующих инженерно-геологических условиях данное явление может быть связано с локальными сезонными изменениями модулей сдвига грунта. Рассмотренная модель позволяет оконтуривать ослабленные области геологической среды в массиве нескальных пород.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Среди рассмотренных результатов отдельных методов геотехнического мониторинга, по мнению автора, наиболее информативными для ГАЭС, построенных на нескальных основаниях, являются: результаты пьезометрических наблюдений в скважинах, которые позволяют корректировать работу дренажей и не допускать избыточного увлажнения грунтов. Высокоточные спутниковые координатные определения и измерения с помощью обратных отвесов позволяют фиксировать динамику деформаций грунтового массива. Сейсмометрические наблюдения не позволяют определять изменения прочностных и деформационных свойств грун-

<sup>3</sup> Осика В.И. и др. Оценка устойчивости водоприемника и склона напорных трубопроводов. Технический отчет. М., 2006. 20 с. Техархив Загорской ГАЭС, инв. №434/754.

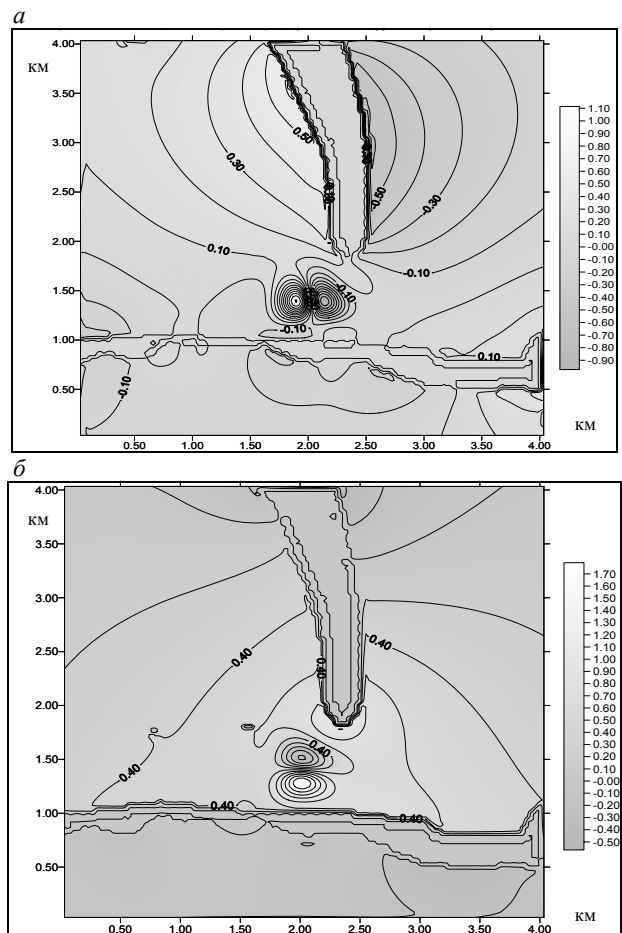


Рис. 5. Изолинии амплитуд суточных наклонов при изменении уровня верхнего бьефа на 1 м, с дуги: а – направление С-Ю; б – направление З-В.

тов, но являются незаменимым источником информации о распространении колебаний в массиве и характере их затухания для любых режимов работы ГАЭС.

Хорошие результаты дают методы компьютерного моделирования, поскольку характерным для ГАЭС является наличие зондирующего сигнала, позволяющего увязать несколько видов режимных наблюдений в единую модель грунтового массива. Анализ результатов компьютерного моделирования позволил сформулировать принципы компоновки сети комплексного геотехнического мониторинга для построения более детальной модели грунтового массива.

При компоновке сети необходимо проводить:

1. Измерение наклонов в основании устоев водоприемника. Для этого в каждом из пунктов наблюдений устанавливаются либо двухкоординатный наклономер, либо 2 однокоординатных. Один из них должен измерять наклоны вдоль потока, другой – поперек потока. Минимальное общее количество 4 шт., точность измерений не хуже 0.1 угл. с.

2. Наблюдения по обратным отвесам. Для

этого производится расстановка по узлам регулярной сетки (например, прямоугольной) на расстоянии не более 200 м друг от друга, глубина заложения якоря 10–15 м, точность — не хуже 1 мкм.

3. Пьезометрические измерения в скважинах, которые проводятся в непосредственной близости от обратных отвесов, пробуренных на ближайший (к заложённому якорю) водоносный горизонт, точность 0.001 м.

Существенным моментом является синхронизация времени и времен опроса всех датчиков и частота опроса, равная 1 отсчету в 20 минут с синхронизацией моментов отсчета не хуже 1 минуты.

Помимо измерения наклонов, уровней и координат, для построения компьютерной модели привлекаются записи об изменениях уровней верхнего бьефа и используются данные о рельефе участка исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данных измерений наклонов устоев водоприемника на отметке «0 м» позволило оценить упругие свойства в реальном грунтовом массиве в основании водоприемника. Полученная величина использована в дальнейших расчетах картины деформаций по всей территории Загорской ГАЭС. Построена модель грунтового массива с учетом неоднородностей среды, позволяющая оконтуривать ослабленные области геологической среды, модули сдвига которой определяются изменениями режимов подземных и поверхностных вод.

Анализ возможностей отдельных методов геотехнического мониторинга позволил сформулировать принципы компоновки сети комплексного геотехнического мониторинга для последующей обработки разнородных данных и получения компьютерной модели грунтового массива.

Разработанный способ построения компьютерной модели грунтового массива для Загорской ГАЭС также может найти применение и для мониторинга устойчивости больших территорий в сейсмоопасных зонах. В этом случае в качестве зондирующего сигнала могут быть использованы фоновые колебания земной коры, и необхо-

димо применение аппаратуры с более чувствительными датчиками.

Комплексный анализ применяемых методов геотехнического мониторинга должен основываться на однотипности инженерно-геологических условий. Сеть режимных наблюдений на ГАЭС может корректироваться в зависимости от специфики гидротехнического объекта и отдельных особенностей инженерно-геологических условий территории его размещения. То есть использовать накопленный в области геотехнического мониторинга опыт следует, прежде всего, исходя из инженерно-геологических условий площадки строительства ГАЭС.

### Список литературы

- Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
- Молоденский С.М.* О локальных аномалиях амплитуд и фаз приливных наклонов и деформаций // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1983. № 7. С. 3–15.
- Молоденский С.М.* Приливы, нутация и внутреннее строение Земли. М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1984. 214 с.
- Молоденский С.М., Осика В.И., Осика И.В., Черненко В.Н.* Усталость элементов железобетонных конструкций водоприемника Загорской ГАЭС по данным об их суточных наклонах и деформациях // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: Доклады и выступления. Научно-техническая конференция 7–9 декабря 2005 г. С.-Петербург, 2006. С. 325–339.
- Осика И.В.* Устойчивость склона напорных трубопроводов Загорской ГАЭС в условиях динамических нагрузок // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения. Материалы XII международной конференции. Т. II (Н-Я). Воронеж, 2006. С. 48–53.
- Юдкевич А.И.* Феномены Загорской ГАЭС // Юбилейный сборник научных трудов Гидропроекта (1930–2000). Вып 159. М.: АО Институт Гидропроект, 2000. С. 269–279.

ОСИКА

**THE COMPLEX APPROACH TO GEOTECHNICAL MONITORING  
OF THE ZAGORSK HAEPS**

**I.V. Osika**

*Establishment of the Russian Academy of Sciences Institute of physics of the Earth of  
O.J. Shmidta of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995*

In article results of the regime supervision applied on Zagorsk HAEPS for tracking a condition of a slope of pressure head pipelines are considered. Results of joint data processing of the measured inclinations and changes of a water level in the top pool (for Zagorsk HAEPS) are resulted. Other possibilities of application of the given measured inclinations are reflected. The method is tested for large hydraulic engineering constructions, and also application for monitoring of stability of the big territories in seismodangerous zones can find.