

АССОЦИАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ
И РАБОТНИКОВ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ
«ГИДРОЭНЕРГЕТИКА РОССИИ»

А. Н. Марчук Н. А. Марчук

ПЛОТИНЫ И ГЕОДИНАМИКА ОПЫТ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2020

Марчук А. Н. Плотины и геодинамика. Опыт натуральных наблюдений /
А. Н. Марчук, Н. А. Марчук. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 316 с.

По результатам многолетних натуральных наблюдений на большом количестве плотин исследуется широкий спектр проблем взаимодействия крупных гидроузлов с литосферой. Высотные бетонные плотины и созданные в результате их возведения большие водохранилища рассматриваются как геоблоки земной коры, оказывающие влияние на геодинамику района, и сами, в свою очередь, подверженные геодинамическим воздействиям. С целью выявления геодинамического влияния высоких бетонных плотин и водохранилищ на напряженно-деформированное состояние прилегающей территории обобщены и проанализированы большие массивы данных натуральных наблюдений за взаимодействием этих уникальных сооружений с геологической средой. Изложены также результаты специальных исследований по выявлению обратного влияния – геодинамических нагрузок на плотины. Обосновывается научная и экономическая эффективность использования многофункциональных измерительных комплексов плотин для изучения региональных тектонических процессов. Высоконапорные бетонные плотины, оснащенные большим количеством многофункциональных приборов, рассматриваются как геодинамические полигоны. Описана методика оперативного прогноза опасных геодинамических явлений, в том числе краткосрочного прогноза землетрясений, путем поиска комплекса предвестников с помощью измерительных систем плотин. Приведены примеры успешных прогнозов землетрясений по данным наблюдений на плотинах Дагестана, Республики Кыргызстан и на Саяно-Шушенской ГЭС, подтвержденные официальными документами. Даны практические рекомендации по учету геодинамических нагрузок при проектировании и эксплуатации плотин в тектонически нестабильных регионах и обеспечению безопасной эксплуатации плотин и водохранилищ.

Книга рассчитана на инженеров-гидротехников, эксплуатационный персонал крупных ГЭС, может быть полезна изыскателям, геомеханикам, геофизикам и сейсмологам, студентам и преподавателям гидротехнических факультетов вузов.

Издано при поддержке Ассоциации «Гидроэнергетика России»

© Марчук А. Н., Марчук Н. А., 2020

© Ассоциация организаций
и работников гидроэнергетики
«Гидроэнергетика России», 2020

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2020

*Книга посвящена рабочим, операторам,
специалистам и ученым
групп мониторинга
и гидротехнических цехов гидроэлектростанций,
которые своим самоотверженным ежедневным трудом
добывают ценнейшую информацию
для обеспечения надежности сооружений
и развития науки*

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Принятые сокращения	10
Введение	12
Глава 1. Большие бетонные плотины как геоблоки земной коры	19
1.1. Масштабность гидроузлов, их влияние на изменения геофизических полей.	19
1.2. Тектонические изменения в зоне крупных водохранилищ.	31
1.3. Крупные гидроузлы как геофизические полигоны.	44
Глава 2. Методика исследований	59
2.1. Организационные основы	59
2.2. История вопроса и постановка задачи	62
2.3. Модернизация измерительных систем плотин	65
Глава 3. Отклик плотин на сильные землетрясения	74
3.1. Общие положения	74
3.2. Каскад Нарынских ГЭС и Кировская плотина	76
3.3. Саяно-Шушенская ГЭС (СШ ГЭС)	89
3.4. Чиркейская ГЭС	100
3.5. Зейская ГЭС	112
3.6. Бурейская ГЭС	127
3.7. Плотина Ингурской ГЭС	129
3.8. Плотина Нурекской ГЭС	139
3.9. Результаты наблюдений на некоторых зарубежных плотинах по материалам ICOLD	144
3.10. Некоторые общие выводы	158
Глава 4. Влияние геодинамики на большие плотины	162
4.1. Токтогульская и Курпсайская ГЭС на р. Нарын в Кыргызстане	162
4.2. Саяно-Шушенская ГЭС	176
4.3. Чиркейская и Миатлинская ГЭС	209

4.4. Зейская ГЭС	232
4.5. Бурейская ГЭС	243
Глава 5. Обобщение и анализ результатов исследований	245
5.1. Арочные плотины	245
5.2. Гравитационные плотины с объемным напряженным состоянием	262
Глава 6. Рекомендации по учету геодинамических воздействий на плотины	264
6.1. Прогноз землетрясений с помощью идентификации комплекса предвестников в измерительных сетях плотин	264
6.2. Рекомендации по предотвращению ущербов от геодинамических воздействий на плотины	280
6.3. Рекомендации ICOLD по проектированию плотин, устойчивых к геодинамическим нагрузкам	286
Заключение	295
Приложение 1. Определение терминов	299
Приложение 2. Краткие сведения о производстве инструментальных наблюдений на сейсмических станциях	303
Приложение 3. Численные значения балльности землетрясений по шкале MSK в зависимости от энергии, эпицентральных расстояний и глубины очага (по данным Южно-Сахалинской ОМСП)	306
Библиографический список	307

ПРЕДИСЛОВИЕ

Около 100 лет назад В. И. Вернадский пришел к выводу, что человек становится геологической силой, меняющей вид нашей планеты. Согласно его концепции, научная мысль меняет явления жизни, геологические процессы, энергетику планеты и может рассматриваться как самостоятельное природное явление. Позже А. Е. Ферсман ввел понятие техногенеза, определив его как целенаправленную техническую деятельность в биосфере. Уже в работах этих замечательных ученых была показана несостоятельность иллюзий о безграничной возможности вторжения человека в литосферу. В 1990-х годах А. В. Николаев и ряд других ученых показали, что антропогенная деятельность становится существенным геодинамическим фактором, а Н. Н. Моисеев доказал необходимость утверждения нового типа мышления, основанного на экологической парадигме.

В русле этих взглядов на техногенез написана и представляемая монография. Важнейшая особенность работы состоит в том, что в ней приведен обширный экспериментальный материал по четырем аспектам проблемы взаимодействия крупных гидроузлов с литосферой.

Во-первых, высоконапорные плотины и созданные в результате их возведения большие водохранилища рассматриваются как единые блоки земной коры, оказывающие существенное влияние на геодинамику района. Вес плотины и воды в водохранилище, сезонные и многолетние колебания уровня водохранилища, глубинный дренаж и изменения порового давления, глубинная и сопрягающая цементация пород под большим давлением, проведение при строительстве большого объема взрывных работ — все это кардинальным образом изменяет картину напряженного состояния вмещающего массива горных пород, снижает их упругие и прочностные свойства. Авторы убедительно доказали необходимость учета такого воздействия на геодинамику района при проектировании и эксплуатации крупных плотин.

Во-вторых, собраны большие массивы данных мониторинга состояния многочисленных плотин и выполнен их детальный анализ с целью выявления последствий воздействия геодинамических нагрузок, в том числе землетрясений различной интенсивности. Установлено, что в большинстве случаев качественно спроектированные и построенные плотины остаются работоспособными, не теряя своих эксплуатационных качеств, даже при достаточно сильных сейсмических воздействиях. В то же время описаны случаи возникновения в результате сейсмических воздействий на плотины весьма серьезных и даже катастрофических последствий. При этом анализируются и особенности воздействия возбужденных землетрясений, а также сочетание сейсмических нагрузок с активизацией оползней, ослаблением контакта бетона плотины и основания, дополнительными нагрузками на основание, возникающими при быстром повышении или понижении уровня водохранилища.

В-третьих, в работе предложена методика прогноза опасных геодинамических процессов, в том числе землетрясений, путем поиска их предвестников с помощью измерительных систем плотин. Фактически это одно из наиболее важных сформулированных в книге предложений – шире использовать уже существующие многофункциональные системы мониторинга напряженно-деформированного состояния плотин для прогноза землетрясений. Представленные материалы убедительно показывают целесообразность практической реализации этого предложения. Для этого необходимо наладить оперативный обмен геофизической информацией между службами наблюдений на плотинах и сейсмическими станциями.

Четвертый аспект рассматриваемой проблемы – анализ накопленного авторами опыта краткосрочного прогнозирования землетрясений. Несмотря на описанные в работе случаи успешного прогноза нескольких землетрясений, документально подтвержденных, эта часть работы вызывает наибольшее количество вопросов, не всегда соглашаешься с интерпретацией тех или иных параметров в качестве предвестников землетрясений.

Однако не будем останавливаться на подробном анализе этих вопросов — оставим это читателям.

Важно подчеркнуть, что в книге обобщены не только результаты собственных многолетних исследований авторов на различных плотинах, но и многочисленные данные, собранные одним из ее авторов, известным специалистом в области обеспечения безопасности плотин доктором технических наук А. Н. Марчуком в период его работы в составе комитетов Международной комиссии по большим плотинам. Можно не сомневаться, что представляемая монография привлечет внимание широкого круга специалистов и будет способствовать повышению уровня безопасности высоконапорных плотин.

А. Я. Сидорин

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- Взр. – промышленный взрыв
ВНИИГ – Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева
ВС – возбужденная сейсмичность
ГГД – гидрогеодинамический предвестник землетрясения
ГЭС – гидроэлектростанция
КИА – контрольно-измерительная аппаратура
НДС – напряженно-деформированное состояние
НПУ – нормальный подпорный (проектный) уровень водохранилища
ОМСП – опытно-методическая сейсмическая партия
ОСР-97 – карта общего сейсмического районирования России 1997 г.
Отм. – отметка геодезическая (превышение над уровнем моря)
ПО – прямой отвес
ОО – обратный отвес
СГС – сдвигомер горизонтальных смещений
П 4 – пьезометр и его номер
ПЛДС – преобразователь линейных деформаций струнный
ПТЭ – правила технической эксплуатации
САК ГС – система автоматизированного контроля гидросооружений
МВ – мерный водослив
Секция 25, с. 18 – номера секций бетонной плотины
СНиП – строительные нормы и правила
СО РАН – Сибирское отделение Российской академии наук
ТЭК – топливно-энергетический комплекс
УВБ – уровень верхнего бьефа (высота поверхности водохранилища)
УМО (ГМО) – уровень (горизонт) мертвого объема (нижняя граница сработки водохранилища)

ЦСГНЭО – Центр службы геодинамических наблюдений
в электроэнергетической отрасли

ГС РАН – геофизическая служба Российской академии наук

$\frac{K=10}{R=100}$ км – обозначение сейсмического события: в числителе энергетический класс, в знаменателе – эпицентральный расстояние до плотины

ICOLD – Международная комиссия по большим плотинам

ICRM – Международное общество по механике скальных пород

МПа – мегапаскаль-единица измерения напряжений

СФО – сейсмофокальная область

ДФГС РАН – Дагестанский филиал Геофизической службы РАН

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель настоящей книги — содействие повышению надежности и безопасности высоконапорных бетонных плотин с большими водохранилищами, а также освоение способа оперативного прогноза опасных геодинамических процессов и землетрясений с помощью измерительных систем плотин. Действовавшие ранее нормативные документы на проектирование плотин (СНиП 2.06.06-85, СНИП 2.06.08-87, СНиП – II-7-81 и др.) не предусматривали учета воздействий на гидротехнические сооружения повторных землетрясений, возбужденной сейсмичности, крипового давления, медленных и блоковых движений земной коры, импульсных гидрогеодинамических нагрузок и других проявлений геодинамического влияния. Вместе с тем по мере увеличения количества, масштабов и параметров крупных гидроузлов, продвижения их в горные области и тектонически нестабильные регионы, повышения степени урбанизации территорий, других техногенных влияний опасность геодинамических воздействий возрастает.

В настоящей работе геодинамика рассматривается только как причина, порождающая дополнительные нагрузки на большие плотины в период их строительства и эксплуатации. Как показывает история человеческой цивилизации, период эксплуатации плотин может быть весьма длительным. Например, Марибский гидроузел в Йемене имеет возраст 1300 лет. Старейшие отечественные плотины — ДнепрогЭС, Гергебилская, эксплуатируются почти 90 лет. За такой период времени вероятность проявления сильных тектонических движений достаточно высока.

Проблема взаимодействия крупных гидроузлов с земной корой не нова, хотя ее научное исследование началось сравнительно недавно вместе с появлением высоконапорных ГЭС в горных районах, с возникновением возбужденной сейсмичности, первых случаев серьезных повреждений плотин в результате сильных землетрясений и медленных тектонических движений. Здесь

должна быть упомянута прежде всего книга Р. Гупты и Б. Растоги «Плотины и землетрясения» (1979), работы Л. Вигеля (1970), С. Ломнитц (1974), И. Шерарда (1974), связанные с первыми атаками геодинамических сил на плотины в районе разлома Сан-Андреас в Калифорнии. Значительный вклад в изучение возбужденной сейсмичности при заполнении крупных водохранилищ внес профессор Александр Божевич (Югославия), длительное время возглавлявший Комитет по сейсмическим аспектам проектирования плотин Международной комиссии по большим плотинам (ICOLD), Г. А. Соболев, К. М. Мирзоев, С. Х. Негматуллаев и др.

В бывшем СССР сильным геодинамическим воздействиям подвергались Токтогульская, Андижанская, Кировская и Курпсайская плотины во время Сусамырского землетрясения в августе 1992 г., плотины Сулакского каскада в Дагестане в 1970 и 1999 гг., плотины Армении и Грузии во время Спитакского (1988 г.) и Рачинского (1991) землетрясений.

В отечественной научной литературе вопросам взаимодействия крупных гидроузлов с земной корой посвящены работы Г. С. Золотарева, И. А. Пирогова, Р. Р. Тизделя, В. П. Солоненко, Р. А. Левковича, И. Л. Нерсесова, В. Н. Крестникова, В. В. Мячкина, А. И. Савича, М. М. Ильина, С. Х. Негматуллаева, К. М. Мирзоева, О. В. Соболевой, А. В. Количко, А. А. Варги, И. А. Парабучева, С. Н. Устинова, Л. Н. Рассказова, Э. Г. Газиева, В. И. Речицкого, А. А. Карлсона, Э. С. Калустяна, Г. И. Кузнецова и многих других. Эти исследования базировались на геомеханических, сейсмометрических, геофизических и геодезических методах и внесли заметный вклад в понимание характера взаимодействия больших плотин с приповерхностной зоной земной коры.

Отдельно следует упомянуть книгу Д. Г. Осики «Флюидный режим сейсмически активных областей» [1981], в которой впервые подчеркнута важнейшая для плотин роль параметров фильтрационного режима как индикатора напряженно-деформированного состояния геологической среды и надежного

предвестника землетрясений. Более того, автор посчитал уже решенной проблему прогноза землетрясений методами геохимии и гидродинамики, нежели комплексом геофизических методов. Позже эта идея развита в книге «Энергетика и флюидодинамика сейсмичности» 2008 г. совместно с В. И. Черкашиным. Соглашаясь в принципе с высокими прогностическими свойствами фильтрационного режима, авторы считают несколько поспешным утверждение о решении проблемы прогноза даже применительно к гидродинамическому режиму в основаниях высоконапорных плотин, где флюидные эффекты увеличиваются на порядки.

Новый импульс к развитию научных исследований геодинамического влияния на плотины был дан решением 42-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН, объявившей 1990-е годы Международным десятилетием борьбы за сокращение жертв и разрушений от стихийных бедствий и техногенных катастроф, а также Государственной научно-технической программой России «Глобальные изменения природной среды и климата». В 1997 г. Европейский центр по геодинамике и сейсмологии провел в Люксембурге представительный семинар по геодинамическим опасностям, связанным с большими плотинами. В этом же году Государственной Думой принят Закон РФ «О безопасности гидротехнических сооружений».

С 1991 г. в ИФЗ им. О. Ю. Шмидта в содружестве с институтами Минпромэнерго РФ, РАО «ЕЭС России» и эксплуатационным персоналом крупных ГЭС начаты целенаправленные исследования геодинамического влияния на высоконапорные бетонные плотины. Для этой цели впервые широко использовались метрологические возможности многофункциональных измерительных систем плотин. К достоинствам этого метода относятся: комплексирование при идентификации предвестников и оценке последствий геодинамических нагрузок, возможности техногенного воздействия на земную кору путем изменения уровня воды в водохранилищах и появления возбужденных землетрясений, длительные временные ряды наблюдений стандартными приборами в стабильных условиях (в достаточно хорошо известной геологической среде) и в регионах, изученных в сеймотектоническом

отношении. Высокие градиенты напряжений и гидродинамических напоров фильтрационных вод в створах плотин, близость их к региональным разломам, оснащённость измерительными системами делают сами плотины высокочувствительными «сенсорами», техногенными геоблоками, встроенными в земную кору, а очень часто – в разломы, по которым в основном и происходят опасные подвижки от геодинамических воздействий. Исследования на плотинах в сейсмически активных районах дают уникальную возможность многократного повторения экспериментов при разных энергетических уровнях геодинамических воздействий для установления причинно-следственных связей и необходимых корреляций. При этом может быть использован уже накопленный материал натуральных наблюдений для ретроспективного анализа, а также текущие и специальные наблюдения.

Однако метод не свободен от недостатков. Трудности ретроспективного анализа многолетних наблюдений на плотинах заключаются в дискретности измерений, принятых в гидротехнике и рассчитанных на контроль статической работы сооружений. Существуют тем не менее возможности их преодоления на основе закона больших чисел, поскольку за годы эксплуатации плотин накоплено множество измерений, сделанных в разное время, по большому количеству приборов. Опыт таких исследований показывает, что в большинстве случаев сильные сейсмические события, а также подготовительный и афтершоковый периоды ощутимых землетрясений обязательно находят отклик в какой-то части измерительных систем плотины.

Кроме того, на каждой плотине существуют периоды непрерывных наблюдений с ежедневными или близкими к этому отсчетами по приборам разных типов. Это, во-первых, первые месяцы после установки контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), во-вторых, период первого наполнения водохранилища и, в-третьих, периоды специальных наблюдений во время экстремальных паводков, сейсмической активности, научных исследований и т. п. Анализ показаний КИА в такие периоды совместно с соответствующим каталогом сейсмических событий может дать ценную информацию.

Вторая сложность заключается в интерпретации результатов наблюдений. Из-за большого числа разнородных сейсмических событий различной энергии, одновременного воздействия гидростатического давления, температуры и других переменных природных и техногенных факторов точно установить долю каждого воздействия трудно. Преодолеть эти трудности можно с переходом от дискретных измерений к непрерывному, автоматизированному мониторингу. В этом случае динамические воздействия легче выделить как остропиковые флуктуации на фоне квазистатических влияний.

В последние годы, с появлением автоматизированных средств измерений и компьютерной памяти, геодинимические наблюдения ведутся непрерывно и могут быть синхронизированы с сейсмометрическим контролем. Такую задачу решает Центр службы геодинимических наблюдений в электроэнергетической отрасли (ЦСГНЭО), созданный на базе института Гидропроект в 1995 г. Деятельность ЦСГНЭО направлена на организацию геофизических полигонов при крупных энергетических объектах в сейсмичных регионах, уточнение степени сейсмической опасности в местах расположения энергетических объектов, выполнение поверочных расчетов на сейсмостойкость.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта (ИФЗ РАН) сконцентрировал усилия на решении фундаментальной научной проблемы – изучении вариаций геофизических полей в зоне влияния крупных плотин и водохранилищ, краткосрочном прогнозе землетрясений в районах размещения гидроузлов с повышенной против проекта расчетной сейсмичностью по карте ОСР-97.

Трудность в разработке темы заключается также в ее междисциплинарном характере на стыке гидротехники, геомеханики, гидродинамики, сейсмологии, тектонофизики и других наук о Земле. Так, например, сейсмологи не используют в своих целях метрологические возможности измерительных систем высоких плотин в сейсмичных регионах, хотя точность и надежность отвесов и гидростатических нивелиров плотин не уступают в точности и надежности наклономерам Островского. Скальные деформометры, дренажная сеть и мерные водосливы успешно контролируют

состояние вмещающих горных пород и гидрогеодинамическое поле. Геодезические наблюдения фиксируют смещения по ближайшим разломам, блоковые движения по берегам и в основании плотин.

Эксплуатационный персонал ГЭС еще недостаточно использует геофизическую и сейсмологическую информацию, слабо знаком с представлениями о предвестниках землетрясений, не учитывает особенностей локальных полей тектонических напряжений, возможности возникновения крипа, медленных движений по разломам и блоковых движений. Не разработаны нормативные документы о действиях эксплуатационного персонала ГЭС при землетрясениях. Геологи и геомеханики часто пренебрегают изменениями свойств оснований как энергонасыщенной среды, подверженной длительным геодинамическим, гидрогеодинамическим и температурным воздействиям в период длительной эксплуатации ГЭС. Геофизики требуют устройства специальных геодинамических полигонов в районах расположения плотин и водохранилищ, недостаточно используя имеющиеся измерительные системы и накопленные материалы натуральных наблюдений. Результаты геофизических исследований не всегда понятны эксплуатационному персоналу ГЭС, так как требуют сложной интерпретации.

Традиционные школы различных наук, заинтересованные ведомства с большим трудом находят общий язык и преодолевают взаимное недоверие. В этом смысле настоящая работа, как мы надеемся, послужит делу взаимопонимания и взаимной пользы.

Следует отметить, что нашей стране принадлежит приоритет в исследовании геодинамического влияния на высокие плотины с использованием для этой цели действующей КИА плотин [Marchuk, 1993]. Международное научное сообщество обратилось к этой теме только в конце 90-х годов прошлого века. Комитет по сейсмическим аспектам проектирования плотин ICOLD только в 2002 г. завершил выпуск четырех документов по этому вопросу, представленных следующими бюллетенями: Неотектоника и плотины, Руководство по сейсмическим наблюдениям на плотине, Руководство по проектированию сейсмостойких

плотин и вспомогательных сооружений, Руководство по проектированию плотин, эффективно сопротивляющихся сильным движениям грунта. Однако и в этих документах не предусматривается прямое широкое использование измерительных систем плотин для контроля за геодинамическими воздействиями.

Настоящая книга написана по материалам исследований, проведенных авторами в 1991–2015 гг. на каскаде Сулакских и Нарынских ГЭС, на Саяно-Шушенской и Зейской ГЭС. Использован также опыт работы д.т.н. А. Н. Марчука в составе комитетов по мониторингу и сейсмическим аспектам проектирования плотин ICOLD. Основные положения и выводы работы докладывались на международных конгрессах Международного общества по механике скальных пород (ISRM, Токио, 1995 г.), Европейского центра геодинамики и сейсмологии (Люксембург, 1997), на симпозиумах ICOLD по безопасности плотин (Барселона, 1998 г., Анталия 1999 г.), на научно-техническом совете Минэнерго РФ, на семинарах Ассоциации Российских геомехаников и Российской инженерной академии.

Книга рассчитана на инженеров-гидротехников, эксплуатационный персонал крупных ГЭС, может быть полезна изыскателям, геомеханикам, геофизикам и сейсмологам, студентам и преподавателям гидротехнических факультетов вузов.

В заключение считаем своим долгом выразить благодарность руководству ОАО «Дагэнерго» и эксплуатационному персоналу Чиркейской, Саяно-Шушенской, Токтогульской, Бурейской и Зейской ГЭС за сотрудничество, руководству АОЗТ «Геликон-МИСИ» за помощь в финансировании исследований. Авторы благодарны светлой памяти академикам РАН Н. П. Лаверову, В. Н. Страхову и Е. И. Шемякину за постоянную поддержку этой научной темы, чл.-корр. РАН С. А. Тихоцкому и к.ф.м.н. А. Я. Сидорину за ценные замечания по редактированию книги.

ГЛАВА 1

БОЛЬШИЕ БЕТОННЫЕ ПЛОТИНЫ КАК ГЕОБЛОКИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

1.1. Масштабность гидроузлов, их влияние на изменения геофизических полей

По мере роста потребностей человечества в энергии и пресной воде, количество больших плотин постоянно увеличивается. По данным ICOLD, контролирующей мировой каталог плотин, в 2000 г. их было более 50 000, в настоящее время около 80 000 (с напором 15 м и более). Неизбежен и процесс продвижения створов плотин в сейсмоактивные регионы, в горы, к истокам рек, вызывающий повышение высоты плотин и напоров. Режим горных водохранилищ отличается быстрой и значительной сменой уровней, что, как известно, создает условия для появления возбужденной сейсмичности, особенно при высоких призмах сработки. Объемы плотин и водохранилищ, мощность гидроэлектростанций достигают громадных размеров, как это следует из таблицы 1.

Большинство высоконапорных плотин бывшего СССР расположены в тектонически нестабильных регионах и проектировались по картам сейсмического районирования ОСР 1957, 1968 и 1978 гг. с корректировкой по карте ОСР-97 (рис. 1). Влияние крупных гидроузлов на тектонику и сейсмологические условия на длительную перспективу не учитывалось.

Воздействие больших плотин на локальные геофизические поля и физико-механические свойства вмещающих горных пород начинается одновременно с началом строительства котлованов, подходных дорог и тоннелей, разгружающих собственные напряжения скальных массивов, открывающих путь экзогенным процессам. Объем выемок с применением буровзрывных работ в котлованах Красноярской ГЭС, например, составил 13,3 млн м³ в котлованах, штольнях, тоннелях и береговом водосбросе Саяно-Шушенской ГЭС – 12 млн м³, при строительстве Нурекской ГЭС

Таблица 1

Самые крупные плотины мира

Плотина (в скобках – страна)	Год построй- ки	Река	Тип плотины	Высота, м	Длина по гребню, м	Объем плотин, млн м ³	Объем водохра- нилища, км ³	Мощ- ность ГЭС, МВт
Итайпу (Бразилия)	1982	Парана	Гравитационная, земляная	196	7 297	33,260	29	12 600
Даниэл Джонсон (Канада)	1968	Мани- куаган	Много- арочная	214	1 314	2,225	141,852	1 292
Ла-Гранд 2 (Канада)	1978	Ла- Гранд	Земляная	168	2 826	23,2	61,715	5 328
Манкуаган (Канада)	1989	Мани- куаган	Многоарочная	214	1 314	22,55	141,852	1 080
Асуан (Египет)	1970	Нил	Каменнонабросная, гравитационная	111	3 830	44,300	168,900	2 100
Кабора-Басса (Мозамбик)	1974	Замбе- зи	Арочная	171	321	510	63,000	4 150
Братская (Россия)	1964	Ангара	Гравитационная, земляная	125	4 417	10,962	169,27	4 500
Красноярская (Россия)	1967	Енисей	Гравитационная	124	1 065	5,580	73,3	6 000

Зяя (Россия)	1978	Зяя	Контрфорсная	115	758	2,160	68,4	1 260
Буряя (Россия)	2005	Буряя	Гравитационная	140	736	3,500	20,0	2 000
Гури (Венесуэла)	1986	Карони	Гравитационная, земляная	162	11 400	77,971	138,00	10 300
Кариба (Замбия, Зимбабве)	1959	Замбези	Арочная	128	579	1,032	180,60	1 266
Строятся и проектируются								
Рогун (Таджикистан)	1991	Вахш	Грунтовая	335	660	71,00	13,3	3 600
Тери (Индия)	1997	Башрат	Грунтовая	261	575	25,64	3,54	2 400
Серра-да-Меса (Бразилия)	1996	Токнти	Грунтовая	150	1 510	12,62	54,4	1 200
Три ущелья (Китай)	стро- ится	Янцзы	Гравитационная	175	1 970	26,890	37,34	17 680
Янгин (Китай)	стро- ится	Хуанхэ	Гравитационная	314	654	13,400	10,0	3 000

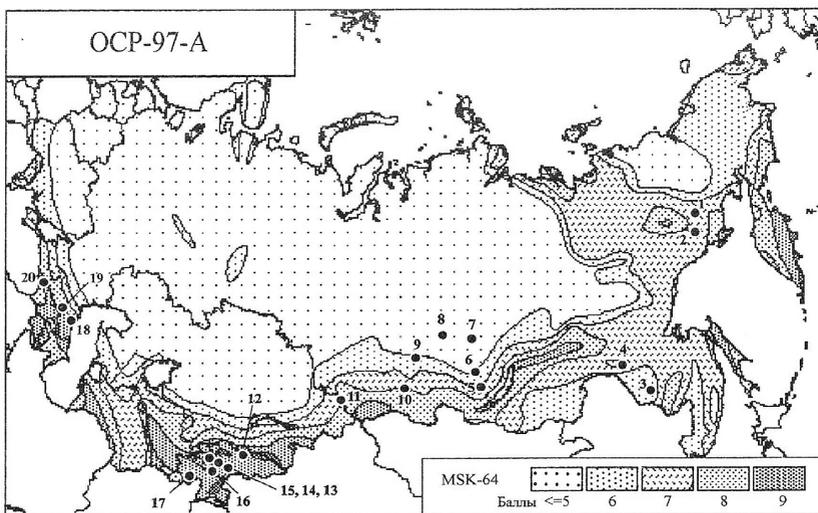


Рис. 1. Размещение крупных ГЭС с высоконапорными плотинами (напор более 60 м) на территории бывшего СССР:
 1 – Колымская, 2 – Усть-Среднеканская, 3 – Бурейская, 4 – Зейская,
 5 – Иркутская (напор 31 м), 6 – Братская, 7 – Усть-Илимская,
 8 – Богучанская, 9 – Красноярская, 10 – Саяно-Шушенская,
 11 – Бухтарминская, 12 – Кировская, 13 – Курпсайская,
 14 – Токтогульская, 15 – Чарвакская, 16 – Андижанская,
 17 – Нурекская, 18 – Миатлинская, 19 – Чиркейская, 20 – Ингурская

перемещено 58 млн м³ грунтовых материалов, по проекту Рогунской ГЭС этот объем достигает 71 млн м³. В Канаде строится плотина с объемом грунта 540 млн м³ и емкостью водохранилища 424 км³. Глубина врезок котлованов в берега достигает 70 м (левый берег Чиркейской плотины), в руслах рек – до 50 м (Ингурская арочная плотина).

Взрывные работы, выветривание пород во вскрытых котлованах, последующее нагружение основания собственным весом сооружения, глубинная и сопрягающая цементация под большим давлением, системы глубинного дренажа, сезонные и многолетние колебания уровня водохранилища, нестабильность температурного режима существенно изменяют естественную

картину напряженного состояния вмещающего массива горных пород. Упругие и прочностные свойства пород резко снижаются (табл. 2).

Таблица 2

**Изменения характеристик горных пород в строительных котлованах ГЭС
(по данным Савича А. И., Ильина М. М., Михайлова А. Д. 1990 г.)**

Породы, объект	До постройки котлована			После сооружения котлована			Глубина изменений, h , м
	V , км/сек	$E \cdot 10^2$, МПа	R , МПа	V , км/сек	$E \cdot 10^2$, МПа	R , МПа	
Тектонически нарушенные известняки Ингури ГЭС	2,5–3,5	45–100	10–25	1–2	10–30	1–5	10–14
Сохранные породы Ингури ГЭС	4,5–5	150–200	60–80	1,5–3,5	20–100	3–30	3–7
Диабазы Усть-Илимской ГЭС	5,5–6,5	200–300	120–170	2–3,5	10–60	15–35	1–5
Долериты Богучанской ГЭС	5–5,5	150–200	90–120	1,5–3,5	5–50	5–30	4–16
Граниты Днепрогэс	5–5,5	150–200	110–150	1–4	8–50	5–60	2–15

При этом собственные напряжения в массиве определяются крайне редко и не учитываются в проектных расчетах даже при высоком уровне тектонических напряжений до строительства (в створе Саяно-Шушенской плотины до 30–40 МПа) и при статически неопределимых типах плотин, когда они проявляются в максимальной степени.

Дополнительная нагрузка в напряжениях на поверхности земной коры в основаниях плотин достигает 15–20 МПа; от веса

воды в водохранилищах — до 3 МПа и является переменной по сезонам года из-за колебаний уровня водохранилища (от 16 м на Зейской до 90 м на Ингурской ГЭС, до 180 м на австрийской плотине Кельнбрайн) и температурных деформаций плотин. Техногенные динамические нагрузки на основания при пропуске больших паводков, сбросе и наборе экстремальных электрических нагрузок ГЭС, сбросе аварийных затворов имеют энергию такого же порядка, как слабые землетрясения, интенсивностью 3–4 балла.

Большую роль в изменении геофизических полей в основаниях плотин и водохранилищ играет их водонасыщение и высокие гидродинамические градиенты в районе створа плотины [Гупта, Растоги, 1979; Киссин, 1982]. Вся сеть разломов и крупных тектонических трещин, попавшая в чашу водохранилища и прилегающая к нему, под действием высоконапорной фильтрации снижает параметры сопротивления сдвигу и активизируется в геодинамическом отношении. Раньше всего это проявляется на откосах и склонах, которые становятся потенциально неустойчивыми. При этом воздействие фильтрующейся воды на горные породы является комплексным. Так, эффект Ребиндера [Ребиндер, Шукин, 1979] вызывает снижение поверхностной прочности пород, водонасыщение глинистых и слабых прослоек уменьшает коэффициент трения и величину сцепления по трещинам, ускоряет экзогенные процессы. Высокие градиенты фильтрационных напоров в зонах тектонических нарушений и трещинах основания под плотиной (в основании Саяно-Шушенской ГЭС до 40) обуславливают механическую и химическую суффозию слабого и растворимого заполнителя трещин. Убедительной иллюстрацией результатов работы описанных механизмов является Бурейский оползень 2018 г.

Весьма сложным является силовое и температурное воздействие фильтрационного потока на трещиноватый массив горных пород основания плотины и водохранилища. Оно включает действие поверхностных сил (веса воды), вызывающих осадку ложа водохранилища, объемное гидростатическое обжатие блоков

и понижение температуры скального массива до 3–4 °С с увеличением раскрытия трещин. Зона влияния фильтрации из водохранилища в зависимости от степени тектонической нарушенности пород может распространяться от 500 м до первых километров [Киссин, 1982; Савич, Ильин, 1990]. Проникновение фильтрационных вод из водохранилища по разломным зонам на глубину 3–5 км может вызвать эффект неустойчивой пароводяной конвекции, когда при высоких температурах и давлениях возможен фазовый переход воды в пар с образованием импульсных выбросов или гидротермального очага землетрясения [Панфилов, 1994]. Вероятность появления такого эффекта высока в местах близкого расположения геотермальных вод и у разломов первого порядка. Есть основания полагать, что гидротермальные очаги вызывают возбужденные землетрясения в районе водохранилищ Чиркейской и Миатлинской ГЭС и что Сусамырское землетрясение 19 августа 1992 г. на северном борту Таласо-Ферганского разлома в Киргизии связано с явлением неустойчивой пароводяной конвекции. По свидетельству компетентных очевидцев, это землетрясение сопровождалось многочисленными фонтанными выбросами белой пароводяной смеси. Линейного вспарывания поверхности при этом не было.

Следует признать, однако, что процессы и последствия взаимодействия грунтовых, в том числе термальных вод с фильтрационными водами из водохранилища и с горными породами на больших глубинах изучены весьма слабо. Отметим также, что описанное выше влияние фильтрационного потока на породы основания может быть сильно ослаблено с течением времени из-за кольматации и отложения наносов со стороны верхнего бьефа. Более понятным является взвешивающее действие фильтрационного потока, которое при быстрых изменениях УВБ вызывает прораствание и развитие горизонтальных трещин, иногда подъем основания за плотиной.

В целом силы тяжести от водохранилища, изменения гидрогеологического и гидродинамического режимов приводохранилищного региона являются главными факторами распространения

зоны влияния крупных гидроузлов на объемы вмещающих горных пород региона, в 50–100 раз превышающих объем водохранилища. Геодезические и сейсмометрические наблюдения в водохранилищных районах Нурекской, Чарвакской и Зейской ГЭС показали, что зона влияния гидроузла на земную кору в плане равна примерно двухкратной ширине водохранилища.

Большие высоконапорные плотины с крупными водохранилищами, создающие неразрывную трехкомпонентную систему «плотина – основание – водохранилище», являются активными блоками земной коры, кардинально изменяющими геофизические поля на больших территориях, и в первую очередь – наиболее чувствительное гидрогеодеформационное поле Земли. При этом характер взаимодействия в этой системе по контактам плотины с горными породами существенно зависит от соотношения деформативности материала плотины и пород основания. Чем выше модуль деформации основания, тем выше уровень контактных напряжений на границе скала–бетон. Как правило, сооружение бывает жестче вмещающей породы (табл. 3). В противном случае на контакте скала–бетон возникают высокие напряжения растяжения с раскрытием трещин.

Таблица 3

Соотношение деформативных свойств бетонных плотин и их оснований

Плотина	Тип плотины	Породы основания	Модуль деформации, МПа	
			$E_{осн.}^{ср.}$	$E_{бет}$
Красноярская	Гравитационная	Граниты	9 000	4 200–5 120
Братская	–	Диабазы, песчаники	13 000–44 000	35 000–38 000
Токтогульская	–	Известняки	9 000–14 000	27 000–30 000
Саяно-Шушенская	Арочная	Метаморфизованные сланцы	16 000 ср.	44 000 ср.
Чиркейская	–	Известняки	5 000–13 000	33 000 ср.

Плотина	Тип плотины	Породы основания	Модуль деформации, МПа	
			$E_{\text{осн.}}^{\text{ср.}}$	$E_{\text{бет}}$
Миатлинская	—	—	5 000–13 000	30 000–35 000
Ингури	—	—	800–5 800	40 000–47 000
Андижанская	Контрфорсная	Метаморфизованные сланцы	3 000–5 000	30 000–38 000
Зейская	—	Диориты	7 000–20 000	28 500–32 000

По указанной причине добиться монолитности контакта разномодульных сред, несмотря на специальные мероприятия, не всегда удастся. При высокой деформативности основания, например в известняках Ингури ГЭС, напротив, происходит уплотнение горных пород на контактах с плотиной, выравнивание упругих свойств массива. Так, исследованиями ЦСГНЭО методом сейсмической томографии сравнительных скоростей упругих волн V_p и V_s в береговых примыканиях этой плотины в 1996 и 2004 гг. обнаружено увеличение упругих свойств пород на 20–30 % [Савич, Ильин, 2005]. Вместе с тем на отдельных локальных участках повышенной фильтрации отмечено снижение скоростей V_p на 7–10 %.

Плотина всегда является постоянным источником возмущений в локальном поле сложившихся тектонических напряжений, практически исключая статический режим этой системы. Напомним, что все нормативные документы по расчетам плотин и натурным наблюдениям на них предусматривали статический режим работы сооружений (кроме расчета на сейсмостойкость по СНиП II-7-81). Вместе с тем переход в настоящее время на автоматизированные системы измерений и непрерывный мониторинг взаимодействия плотин с земной корой обнаруживают динамический характер изменения контролируемых параметров, их постоянные флуктуации, выходящие за пределы точности измерений. Таким образом, всякая крупная бетонная плотина в тектонически нестабильном регионе представляет собой активный блок земной коры в активной геологической среде.

Именно динамический характер взаимодействия плотины с окружающей средой часто определяет степень ее безопасности и риска аварии. Статистика аварий и инцидентов в мире свидетельствует о том, что более половины всех аварийных ситуаций на плотинах в горных районах связаны с характером взаимодействия с основанием особенно в первые годы наполнения водохранилища [Калустян, 1983]. С точки зрения тектоники бетонная плотина может рассматриваться как блок земной коры техногенного происхождения, имплантированный в русловой разлом. Если предположить, что вмещающий плотину геоблок имеет II–III порядок, т. е. вычленен разломами второго (возможно третьего) порядка, что определяется при изысканиях, то крупную бетонную плотину с объемом бетона 5–10 млн м³ и более можно считать техногенным геоблоком четвертого порядка, имеющим свою иерархию.

Для массивных гравитационных и контрфорсных плотин деформационные швы между секциями сооружения определяют размеры блоков V порядка, строительные швы между блоками бетонирования – VI порядок. Блоки VII порядка возникают в результате трещинообразования в бетоне в процессе строительства и первые годы наполнения водохранилища и адаптации сооружения к основанию. В отличие от анизотропного или квазиоднородного вмещающего геоблока плотина, особенно арочная, представляет собой изотропный блок с практически однородными физико-механическими свойствами бетона. Различиями марок бетона по конструктивным зонам, степенью армирования, конструктивными отличиями секций можно пренебречь, поскольку основную нагрузку взаимодействия с основанием несет нижняя, массивная однородная часть плотины, передающая на основание сдвиговые усилия. Статически неопределимая арочная или гравитационная распорная (например, Токтогульская, Курпсайская) плотина является единым однородным геоблоком, который активно взаимодействует с окружающей геологической средой, передавая на основание и берега усилия от гидростатического давления.

Характер взаимодействия плотин с вмещающим геоблоком в решающей степени зависит от конструкции плотины, способов ее сопряжения с основанием. Для бетонных плотин существует два принципиальных способа сочленения со скальным основанием: жесткий со сцеплением и с компенсирующими устройствами. В первом случае удаляется выветрелый слой породы, бетон укладывается на сохранную скалу, тщательно промытую. Прискальный бетон имеет специальный состав – пластичный, с высоким содержанием цемента для обеспечения надежной адгезии и монолитности контакта. Сопряжение с береговыми откосами выполняется с большим заглублением в массив за пределы трещин разгрузки и бортового отпора, с нарезкой ступеней – опорных полок. Через скважины в прискальных бетонных блоках выполняется площадная и сопрягающая цементация для повышения прочности и водонепроницаемости контакта. Исследования влияния цементации на деформативные свойства оснований на Красноярской, Ингурской, Чиркейской и Усть-Илимской ГЭС свидетельствуют о существенном повышении модуля деформации сильнотрещиноватых и слабых пород и незначительном ее влиянии на прочные изверженные породы. Так, при повторном нагружении зацементированных плитчатых известняков в основании Чиркейской плотины их модуль деформации увеличился в среднем в 4,3 раза, а на трапах Усть-Илимской ГЭС эффект цементации остался незамеченным. При этом отмечено, что сопротивляемость пород сдвигу цементация не увеличивает [Марчук, 1983]. При жестком способе сочленения, который применяется часто, любые деформации основания вызывают напряжения в сооружении и во многих случаях – трещинообразование. Величина контактных напряжений зависит от деформативных свойств бетона и скальной породы основания, соотношения модулей деформации этих материалов и действующих на контакте нагрузок, величины фильтрационного гидродинамического давления, амплитуды изменения сезонных температур воздуха.

Во втором случае, когда на стадии проектирования ожидаются сейсмогенные или криповые подвижки в основании, сопряжение

выполняется с помощью компенсирующих устройств – специальной разрезкой конструктивными межсекционными швами (Токтогульская плотина), периметральным швом, отчленяющим плотину от основания (Ингурская, Миатлинская плотины), бетонные понуры с гидроизоляцией (плотина Цейцир в Австрии), компенсирующие швы (Байна-Башта в Югославии). Такие решения не всегда являются эффективными и не гарантируют от трещин, поскольку предугадать размеры и направления тектонических смещений чаще не представляется возможным. Интенсивному трещинообразованию подвергаются в первую очередь береговые секции.

По характеру силового взаимодействия с вмещающим геоблоком следует выделить арочные плотины, передающие в берега нагрузку от гидростатического давления и изменения температуры. Главная особенность бетонной плотины как геоблока состоит в том, что, в отличие от всестороннего сжатия, характерного для блоков горных пород, блок-плотина находится под действием одностороннего гидростатического и взвешивающего давления, которому сопротивляется собственным весом (гравитационная плотина) или частичной передачей давления на береговые упоры (арочная плотина). По этой причине, в отличие от естественных геоблоков, испытывающих по граням сжимающие и касательные напряжения, плотина испытывает по контактными поверхностям и местную концентрацию растягивающих напряжений, которые, как правило, снимаются трещинообразованием.

Раскрытие контактных трещин представляет главную опасность для устойчивости плотин, т. к. они снижают параметры сопротивления сдвигу – трение и сцепление по контактной поверхности, и создают условия возникновения взвешивающего гидростатического давления, часто с полным действующим на плотину напором. Другой важной особенностью бетонных плотин как геоблоков является возможность дифференцированных движений по контактам с вмещающими породами. Плотина, перекрывающая русло реки, часто перекрывает и русловой разлом или его оперения. Русловой разлом под плотиной создает усло-

вия для дифференцированных движений берегов появления высокого пульсирующего взвешивающего противодействия, увеличение скальвающих напряжений в береговых примыканиях. Нормальные к руслу тектонические нарушения могут вызвать подвижность вдоль створа, различную податливость берегов, неравномерные плановые смещения, особенно при разновысоких берегах.

1.2. Тектонические изменения в зоне крупных водохранилищ

Современные водохранилища гидроузлов достигают огромных размеров по объему, площади зеркала и глубине: Кариба (Родезия) – 180 км³, Братское (Россия) – 169 км³ с максимальной глубиной 120 м, Нурекское водохранилище (Таджикистан) имеет глубину 300 м, Джварское (Грузия) – 270 м, Чиркейское и Саяно-Шушенское – более 200 м. Влияние таких крупных водохранилищ на земную кору оказывается весьма заметным и многообразным. Пригрузка обширных территорий водой вызывает осадку ложа водохранилища и увеличение напряжений в толще пород на большую глубину. Водонасыщение пород основания по разломам и тектоническим трещинам увеличивает порово-трещинное давление, меняет гидродинамический, температурный и геохимический режим горных пород, уменьшает их сопротивление сдвигу, вызывает эффект Ребиндера (снижение поверхностной прочности горных пород до 5 %), изменяет естественное поле тектонических напряжений, активизирует унаследованные движения и сейсмический потенциал залеченных разломов. Изменяются сейсмологические условия, скорости распространения сейсмических волн. К сожалению, отечественная гидротехническая наука не имеет примеров повторного исследования *in situ* параметров сопротивления сдвигу пород основания в процессе эксплуатации больших плотин. Такие исследования были проведены в Австрии перед ремонтом плотины Кельнбрайн. Оказалось, что массивные крепкие гнейсы с модулем деформации 30–35 ГПа за 10 лет, с 1977 по 1987 г., уменьшили показатели

сцепления с 7 до 6 Н/мм², а слоистые гнейсы при повторном сдвиге срезанных штампов показали величину сцепления в 4,5 раза меньше первоначальной.

Для понимания тектонического влияния водохранилищ на земную кору следует напомнить современные представления о строении Земли (табл. 4).

Вся земная кора рассечена системой глубинных разломов. Наиболее мощная толща литосферы обнаружена под горными сооружениями (Анды 70–74 км, Альпы, Тянь-Шань 65 км, Кавказ 40 км). В пределах платформ мощность коры 35–40 км. Самые тонкие области твердой коры называются рифтовыми зонами или грабенами (Байкальский рифт 20–30 км) Наиболее мобильной областью является верхняя мантия, ее верхняя часть, где происходит миграция вещества по горизонталям и по разломам. Именно эта мобильность и порождает геодинамические процессы – тектонические движения, вулканизм, метаморфизм, сейсмичность. Землетрясения вызывают разрывы в земной коре, преодолевая ее прочность. Предел прочности литосферы [Sibson, 1974]

$$\sigma_{\text{пр}} = a\rho gh(1 - \lambda)$$

где ρ – плотность породы, h – глубина, λ – отношение давления порового флюида к литостатическому давлению, a – параметр, зависящий от типа деформации $a = 3, 1,22, 0,75$ соответственно для сжатия, сдвига и растяжения. Поровое давление флюида часто принимается равным гидростатическому, полагая $\lambda = 0,36$ [Артюшков, 1993]. Величина горизонтальных тектонических напряжений σ_z , действующих на плотины со стороны береговых примыканий, находится в пределах между литостатическим давлением по Терцаги–Диннику и пределом прочности пород вмещающего геоблока по Сибсону:

$$a\rho gh(1 - \lambda) > \sigma_z > \rho gh(1 - \lambda).$$

Сжимающие напряжения в настоящее время наблюдаются на части континентов, превышающей 50 % их общей площади. При этом максимальные напряжения сжатия обнаруживаются,

Таблица 4

Схема строения Земли

Индекс	Зона	Глубина h , км	Скорость V_p , км/с	Скорость V_s , км/с	Плотность пород ρ , г/см ³	Давление p , Па	Температура T , °С
A Граница Моховичича	Земная кора (твердая)	До 70 перем. толщ. $h_{\text{ср}} = 40$				10^4	700
B Граница Голицина	Верхняя мантия	410	7,8 9,0	4,4 5,0	3,33 3,77	$14 \cdot 10^4$	2500
C	Переходная зона	1000	9,0 11,4	5,0 6,4	3,79 4,54	$39 \cdot 10^4$	3500
D Граница Гутенберга	Нижняя мантия	2900	11,4 13,6	6,4 7,3	4,60 5,53	$137 \cdot 10^4$	4000
E	Внешнее ядро	4980	8,1 10,4	— —	9,92 12,12	$317 \cdot 10^4$	3000
F Переходная зона	Переходная зона	5120	10,4 9,5	— —	12,13 12,19	$327 \cdot 10^4$	2700
G	Внутреннее ядро	6370	11,2 11,3	— —	12,20 12,46	$364 \cdot 10^4$	2900

как правило, в областях сложнопостроенных горных сооружений — синклиналиях и антиклиналях. Деформации земной коры тем больше, чем больше снижается прочность литосферного слоя при наличии активного и переменного водонасыщения.

Чаще всего ученые выделяют восемь типов земной коры — три континентальных и пять океанических, которые сводятся к двум сейсмическим моделям континентального и океанического типа. Земную кору представляют слоистой средой с горизонтальными границами между слоями, различающимися плотностью пород и скоростью распространения сейсмических волн. Для континентальной коры существует граница консолидированного фундамента со скоростью прохождения сейсмических волн 5,8–6,2 км/с и наиболее выдержанная граница Мохоровичича (Мохо) со скоростями от 7,9 до 8,2 км/с, отделяющая кору от верхней мантии. Глубинные разломы обнаруживаются по гравитационным и магнитным аномалиям. Блоково-слоистое строение земной коры и верхней мантии прослеживается в пределах как континентальной, так и океанической коры. Надо полагать, что тектонические изменения, связанные с возникновением крупных глубоких водохранилищ, охватывают приповерхностную зону земной коры на глубину, равную глубине возможного проникновения свободной воды. По этой проблеме существуют различные мнения. И. Г. Киссин, например, считает, что проникновение воды возможно до глубин, на которых породы еще сохраняют коллекторные свойства и на которых расположено максимальное число гипоцентров — до 20 км. [Киссин, 1982]. Мы разделяем это мнение. А. И. Савич считает, что эта граница существенно выше из-за высоких тектонических напряжений сжатия.

Тектонические изменения в приводохранилищных районах фиксируются нивелировками воронки оседания по реперам в верхнем и нижнем бьефах на расстоянии 2–3 км и более в обе стороны от створа плотины. Впервые существенная разница между расчетными и фактическими осадками плотины и ложа водохранилища выявлена геодезическими наблюдениями в зоне

влияния водохранилища Братской ГЭС. Расчетная осадка Братской плотины определялась решением задачи Буссенеска для упругого полупространства. Полученное значение максимальной проектной осадки определено в 37 мм, тогда как измеренная ее величина составила 73 мм. Это различие было объяснено геомеханическими причинами — особенностями двухслойного основания с податливым подстилающим диабазовым слоем песчаников и неучтенной нагрузкой от веса воды в водохранилище. Возможность неотектонических проявлений не принималась во внимание, хотя при наполнении водохранилища были отмечены толчки возбужденной сейсмичности [Г. К. Суханов, Р. Р. Тиздель и др., 1978]. Более поздними нивелировками воронки оседания (В. Г. Иванов) отмечено отсутствие корреляции осадок с УВБ для удаленных от плотины реперов в нижнем бьефе около пади Турока, в верхнем бьефе — в районе затопленного Падунского порога, где трассируются разломы. В приплотинной зоне сохранялась линейная зависимость с коэффициентом корреляции 0,52–0,94.

За более чем 50-летний период эксплуатации основание Братской ГЭС претерпело три характерных этапа. На первом этапе, 1961–1968 гг., проявились свойства верхнего прочного, жесткого и водонепроницаемого диабазового слоя. Высокий модуль деформации основания и рост гидростатического давления обусловили возникновение трещины под напорной гранью на контакте скала–бетон и разуплотнение приконтактной зоны диабазового слоя. На втором этапе, при возникновении нормального подпорного уровня (НПУ), проявилась деформативность подстилающего слоя песчаников, прогиб диабазового слоя и рост осадки сооружения. При этом сравнительно тонкий верхний слой диабазового основания испытал растяжение с увеличением разуплотнения и нарушением цементационной завесы.

По состоянию на 1995 г. после трех многолетних циклов наполнения водохранилища до НПУ и его сработки проявились пластические свойства подстилающих слоев основания — песчаников с включениями алевролитов в напорном подтрапповом

горизонте грунтовых вод. По некоторым исследованиям [Лешиков, Тржцинский, 1982] скорость реологических процессов, вызывающих дальнейшую осадку ложа водохранилища, в наиболее широкой и глубокой его части достигает около 8 мм/год, что в 2–3 раза превышает среднюю скорость прогибания платформенных участков аналогичного строения. Предполагается, что наиболее пластичные прослойки выжимаются к краям водохранилища и вверх по разломам.

Сопоставление двух циклов сработки и наполнения Братского водохранилища в 1982–1984 гг. и в 1990–1994 гг. по вертикальным деформациям основания плотины показало, что во втором цикле приращения осадки были в 3–10 раз меньше, чем в первом, а у правого берега, где толщина диабазов меньше, даже отмечено восстановление осадки. Отмечен также подъем якорей обратных отвесов, заделанных на глубине 30 м. Уменьшились фильтрационные расходы в основании плотины за период 1985–1995 гг. с 38,3 до 12,6 л/с, что согласуется с характером процесса проявления пластических деформаций по краям водохранилища. Впрочем, здесь возможно и влияние кольматации. С 1990 г. всеми обратными отвесами плотины, по данным руководителя группы натурных наблюдений З. И. Соловьевой, отмечаются необратимые горизонтальные смещения верхней части плотины в нижний бьеф [Марчук, 1996] и рост осадок в широкой и глубокой части водохранилища. На космических снимках различается радиальная система новых разломов в чаше водохранилища. Возможно, этому способствует откачка солевых рассолов для нужд Братского хлорного завода из подтрапповых горизонтов водохранилища.

В процессе дешифрования космических снимков и морфо-структурного анализа региона расположения водохранилища Чиркейской ГЭС получены аналогичные новые данные о кольцевых структурах и линеаментах. Наиболее приподнятый Салатау-Гимринский покров напоздаст на межгорную Чиркей-Буйнакскую депрессию. К этой зоне надвига приурочены мелкофокусные землетрясения с глубиной очагов от 2 до 4 км. Диаметр

внешнего кольца структуры составляет около 25 км, а внутреннего овала «проседания» — 15 км. Основание Чиркейской ГЭС испытывает воздымание на 4–5 мм/год [Асманов и др., 2003; Даниялов и др. 2003], а по береговой линии водохранилища сформированы многочисленные оползневые массивы по склонам Хадумской антиклинали.

Ф. Н. Лещиков и Ю. Б. Тржцинский [1982] также отмечают влияние ангарских водохранилищ на активизацию оползней (Окинская акватория), карстов абразий и эрозии. Основной причиной оползней признается разуплотнение глинистых пород. Кроме того, в прибрежных зонах шириной 2–3 км от береговой линии проявились сульфатные и карбонатные карсты. Количество свежих провалов насчитывается до 10 на 1 км².

На правом берегу водохранилища ГЭС Хадита (Ирак) изучается образование карстовой полости, которая угрожает увеличением обходной фильтрации. Оползневые и криповые процессы с вовлечением больших объемов горных масс отмечены также на береговой линии водохранилища Чиркейской ГЭС, на правом берегу в створе Миатлинской ГЭС, на участке ГЭС Вахлич (Канада), у плотины Таблачака (Перу), в районе ГЭС Мейшан (КНР) [Варга, Ременяк, 2006].

Особенности геологии основания Приангарья и Прибайкалья определили высокую чувствительность Братской плотины к относительно далеким сейсмическим событиям. Ретроспективное исследование отклика КИА на наиболее сильные события периода эксплуатации Братской ГЭС показали, например, что на землетрясение 30.08.1966 с магнитудой $M = 5,5$ на расстоянии 500 км с эпицентром на Южном Байкале откликнулись все отвесы 30 секций плотины, а отвес 1-50-30 показал отклонение на 6 мм и вернулся назад на 5 мм только в декабре 1966 г. при толчке 03.12.1966 $M = 4,5$, $R = 500$ км. На землетрясение 22.08.1967 с магнитудой 5,5, эпицентральной дистанцией $R = 600$ км в районе Северо-Муйского хребта откликнулись все отвесы секции 50, отвес 1-66-40 в секции 60 и другие.

Максимальный отклик показал отвес 1-60-40 до 5 мм, который вернулся на место только в ноябре после толчка 03.11.1967 с энергетическим коэффициентом $K = 10$, $R = 480$ км. При землетрясении 26.11.1968 $M = 5,3$, отвес 1-50-38 в секции 50 показал необратимое отклонение на 6 мм. Отклики на эти же события имеются в графиках пьезометров и контактных телетензометров. Очевидно, водонасыщение платформенных областей, тяжелые солевые рассолы в основании существенно повышают проницаемость и скорость продольных сейсмических волн и длинных деформаций [Невский, 1999]. Увеличение скоростей сейсмических волн в регионе после создания водохранилища отмечалось также на Нурекской и Саяно-Шушенской ГЭС.

При обследовании сооружений Братской ГЭС в 1995 году комиссией Российской инженерной Академии [Марчук, 1996] отмечены признаки геодинамического влияния на плотину – ее объемное напряженное состояние с продольным сжатием до 2,7 МПа, изменения фильтрационного и геохимического режима, отклик на сильные землетрясения в Прибайкалье. Тщательное изучение геодезических измерений вертикальных движений на приплотинных территориях Братской и Усть-Илимской ГЭС [Карлсон, Меркуров, 2004] показали дифференцированное движение берегов, независимость этих движений от УВБ, их совпадение с региональными разрывными нарушениями. Высказано предположение о связи этих движений с сейсмическими событиями в регионе, отмечена необходимость непрерывных наблюдений за деформациями основания, на что неоднократно обращалось внимание в наших работах [Марчук, 1994 и др.].

Проведенное нами сопоставление графиков вертикальных движений береговых примыканий Братской плотины с каталогом сильных сейсмических событий в Прибайкалье и в Приангарье показало наличие связи между ними. Так, наиболее значительные флуктуации превышений между берегами (марки 528 и 5632 в галерее на отм. 307 м, связанные с изменениями УВБ, совпадают также по времени с наиболее сильными землетрясениями (рис. 2) 27 декабря 1991 г. с магнитудой $M = 6,5$, когда в Брат-

ске интенсивность сотрясений была 4 балла, 14 февраля 1992 г. $M = 5,9$, 29 июня 1995 г. с магнитудой $M = 5,7$ и 13 апреля 1996 г. с магнитудой $M = 4,9$, все события на расстоянии 500–600 км к югу от плотины. Разница в подвижках берегов на 7 мм и более может свидетельствовать об активизации руслового разрывного нарушения в нижнем бьефе Братской ГЭС.

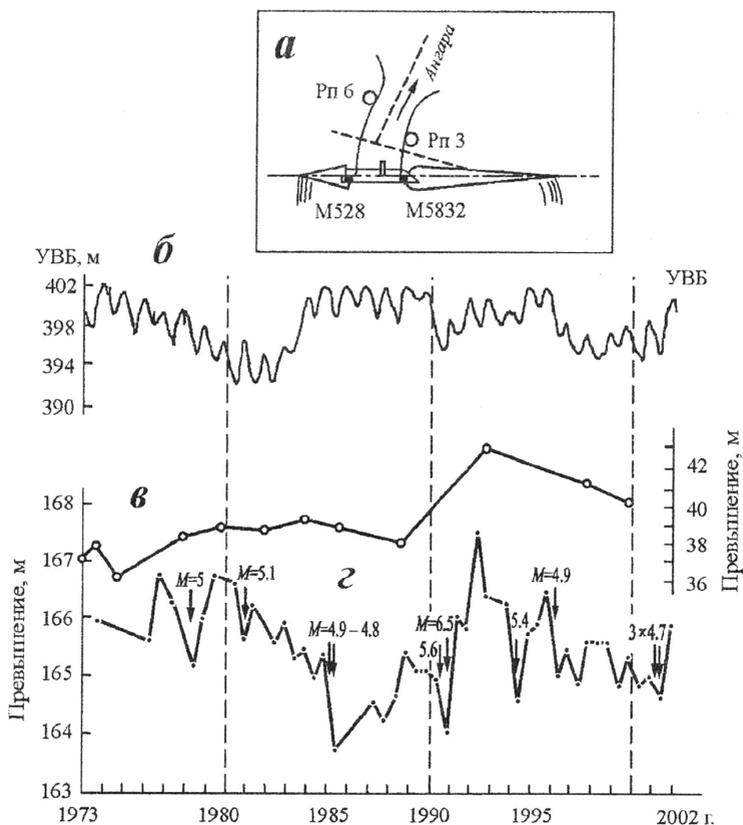


Рис. 2. Влияние землетрясений Прибайкалья на вертикальные смещения марок в галерее плотины Братской ГЭС на отм. 307 м (с использованием данных А. Карлсона):

- a* – схема размещения геодезических знаков, *б* – УВБ,
- в* – превышения между реперами 3 и 6,
- г* – превышения между марками 528 и 5632

В створе Усть-Илимской ГЭС обращает на себя внимание постоянный тренд монотонного увеличения превышения на правом берегу между репером в нижнем бьефе на расстоянии одного километра от плотины и примыканием плотины к берегу (М 5482). Весьма вероятно, что здесь имеет место медленное тектоническое движение.

Для плотин на карбонатных породах большую опасность представляют карстообразования в бортах водохранилищ. В верхнемеловых известняках района Чиркейской ГЭС обнаружены карстово-трещинные источники с большим дебитом до $4 \text{ м}^3/\text{мин}$ [Асманов и др., 2003]. На Джварском водохранилище Ингурской ГЭС при расчетной осадке 10–30 мм в зоне Ткварчельской флексуры измерена осадка свыше 90 мм и поднятия в нижнем бьефе за плотиной, не имеющие связи с УВБ. Более того, некоторые репера опускались при общем поднятии поверхности. Такие явления в приразломных зонах отмечались и на других водохранилищах. Аномальные смещения реперов имели место в водохранилищной зоне Токтогульской ГЭС, особенно в зоне влияния Таласо-Ферганского и Нарыно-Чичканского разломов. Максимальные смещения, многократно превышающие расчетные, фиксировались в период 1981–1982 гг., который отличался повышенной сейсмической активностью. С 1982 г. при увеличении гидростатической нагрузки отмечалось поднятие прибрежных реперов, а при сбросе воды – их опускание. Величина смещений достигала первых десятков миллиметров с максимумом в зоне Таласо-Ферганского разлома, тогда как на западном берегу водохранилища аномалий не отмечалось. При достижении максимума УВБ в 1988 г. произошло резкое опускание всего южного побережья, сменившееся поднятием в 1989–1990 гг. с амплитудой колебания более 70 мм. Возможно, это были деформационные предвестники Сусамырского землетрясения. В этот период отмечались изменения векторов деформации земной поверхности по всей зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня, поэтому связать их появление с водохранилищем было бы неправомерно.

Осадки в зоне Нурекского водохранилища в основном развивались в соответствии с расчетной моделью. Исключением являются два репера, которые опускались с большой скоростью. Причинами этой аномалии могут быть литостатические (хребет Сурх), геологические особенности (солевые прослойки), а также сейсмологические региональные условия, отмеченные и в зоне Токтогульского водохранилища. Что касается возможности растворения солевых пластов, то роль водохранилища в этом деле очевидна.

Деформации прибрежной головной части Зейского водохранилища определяются сетью разломов в районе створа и активным проявлением блоковых движений. Наличие руслового разлома и литостатическая неравномерность берегов вызвали различный по знаку характер деформирования береговой линии. На правом, более высоком, берегу развивались в основном осадки со слабым поднятием в нижнем бьефе, а на левом — в основном подъем с одним резким понижением (до 50 мм в 1997 г.) в створе плотины. Размах колебаний блоковых движений, по данным нивелировок воронок оседания геодезической службы ГЭС, достигал 21–50 мм (соответственно репера № 232 и 207). В последние маловодные 5 лет (1997–2002 гг.) наблюдается подъем реперов, более заметный на левом берегу (до 10 мм). Эта особенность локальной геологической среды отмечалась еще в период изысканий при строительстве [Корчагин, 1974].

Тектонические изменения под влиянием водохранилищ наблюдаются даже в пределах асейсмичной Русской платформы. Так, в линеаментной зоне в районе Чебоксарского водохранилища, в пересечении разломов, НИИ геологических и геоэкологических проблем обнаружил куполообразное внедрение глубинных вод в пределы верхних водоносных горизонтов. Сульфатные воды с включением тяжелых редкоземельных металлов указывают на возможность тектонических подвижек, которая подтверждается неравномерностью осадок секций здания ГЭС. Проведен геохимический анализ вод из 47 пьезометров. Доля глубинных вод точечного поступления под тремя секциями ГЭС достигла

90–93 %. Исследователи пришли к выводу о неотектонической активизации разломов в пределах Горьковско-Кильмезской линеаментной зоны и необходимости установки сейсмометрической аппаратуры на Чебоксарской ГЭС [Тихонов, Лагутин, 2004].

В основании Воткинской ГЭС на р. Каме, расположенной между восточным крылом Русской платформы и Уралом, через 16 лет после ввода ее в эксплуатацию обнаружили выходы тонкодисперсных обогащенных марганцем вод, заливших дренажные системы грунтовых плотин. Поскольку в материалах инженерно-геологических изысканий 1950–1952 гг. и химического анализа подземных вод до глубины 60 м в коренных породах – песчаниках и алевронитах – наличие марганца не упоминается [Лазарев, 1974; Сольский, Гусакова, 2005] можно предположить глубинное хемогенное его происхождение. ВНИИГ, исследующий эту проблему, признал ситуацию потенциально опасной.

В заключение раздела следует отметить, что проблема тектонических изменений в зонах влияния водохранилищ находится в самом начале исследований и в теоретическом и в экспериментальном плане. Здесь можно отметить работы В. В. Ружича, М. В. Невского и С. В. Гольдина [Ружич, Невский, 1999], касающиеся инициирования активности приразломных зон и сверхдлиннопериодных деформаций на разломах. Оба этих явления, вызванных изменениями нагрузки от веса воды и флюидной агрессии, имеют место в мульдах водохранилищ большой глубины (100 м и более) и являются главными причинами структурной перестройки блочной иерархии с изменением геофизических полей. Все высоконапорные гидроузлы с бетонными плотинами в тектонически нестабильных регионах по временным геологическим меркам являются молодыми, а потому основные тектонические изменения ожидают нас в будущем и к ним следует готовиться.

С известной долей определенности можно утверждать, что под влиянием переменной нагрузки от веса воды в депрессиях и мульдах водохранилищ возможно развитие опережающих разломов, возникновение новых разломов и линеаментов. Эти про-

цессы сопровождаются возбужденной сейсмичностью и изменением естественного поля напряжений и других геофизических полей. Их интенсивность зависит от величины изменений УВБ и тектонической активности региона.

В результате водонасыщения вмещающей геологической среды, неустановившегося гидродинамического режима, снижения параметров сопротивления сдвигу горных пород возможна активизация унаследованных движений, особенно в сложнопостроенных горных сооружениях, медленных криповых и блоковых движений с образованием потенциально неустойчивых и оползневых массивов. Наличие развитой трещиноватости, растворимых минералов или глинистых прослоек интенсифицирует эти процессы. Активизации неотектоники в зоне водохранилищ способствуют также неравномерность рельефа в районе створа, русловые разрывные нарушения и разломы с дифференцированной работой берегов, литологические особенности, высокие тектонические напряжения.

На больших территориях, занятых водохранилищами и прилегающими геоблоками, изменяются сейсмологические условия. Помимо явления возбужденной сейсмичности изменяются скорости продольных V_p и поперечных V_s сейсмических волн и их соотношение, которое является одним из прогностических признаков. В зоне влияния водохранилищ нарушается соотношение в количестве толчков разных энергетических классов (тангенс угла наклона графика повторяемости). Исследование влияния Чарвакского водохранилища на параметры сейсмического режима [Плотникова, Уломов, Махмудова, 1983 г.] показало резкое увеличение параметра V_p/V_s после заполнения водохранилища в 1971 г. от 1,64–1,67 до 1,80 в 1975 г. Алтае-Саянская ОМСЭ в первые годы наблюдений за сейсмичностью в районе Саяно-Шушенской ГЭС также отметила увеличение скоростей V_p . Авторы объясняют это ростом модуля деформации пород под влиянием сжатия от веса воды в водохранилище и постоянством модуля сдвига, что обеспечивает неизменность скоростей V_s . Такие же исследования Южно-Сахалинской ОМСП в районе

Зейского водохранилища [Корчагин, Шароглазова, Чеботов, 1983 г.] выявили лишь незначительные локальные вариации V_p/V_s с колебаниями вокруг средней величины 1,73. А. И. Савич (1990) на Ингурской ГЭС установил почти прямую зависимость изменения скоростей сейсмических волн от скорости и величины изменений УВБ. В каждом отдельном случае специфика этих изменений зависит от размеров водохранилища и призмы сработки, от характеристик пород вмещающей геологической среды.

Анализ пространственного распределения эпицентров землетрясений в районе Зейской и других ГЭС подтвердил их приуроченность к разрывным тектоническим нарушениям. Очаги возбужденных землетрясений тяготеют к бортам водохранилищ при подъеме УВБ, а при сработке водохранилищ наблюдается обратный процесс – стягивание очагов к плотине и к наиболее глубокой части водохранилища.

Наиболее ярким и наглядным проявлением неотектоники является сброс гигантского оползня в зоне Бурейского водохранилища в ноябре 2018 г. на расстоянии примерно 90 км от створа Бурейской ГЭС. Сброс произошел в хвосте водохранилища общей длиной 140 км в результате комплекса причин – подпора отводохранилища, длительных дождей и дальних сейсмических событий в регионе.

Описанные тектонические изменения в створах и приводохранилищных регионах высоконапорных плотин не представляют для них прямой опасности. Однако активизация русловых разломов, блоковые движения в створе могут нарушать противотрационные устройства, вызывать трещинообразование, содействовать процессу старения плотин.

1.3. Крупные гидроузлы как геофизические полигоны

Размещение крупных водохранилищ и плотин традиционно выбиралось так, чтобы предельно возможный объем воды размещался в компактных глубоких депрессиях и мульдах, а плотина – в максимально узком створе (рис. 3). Такое сочетание рельефа,

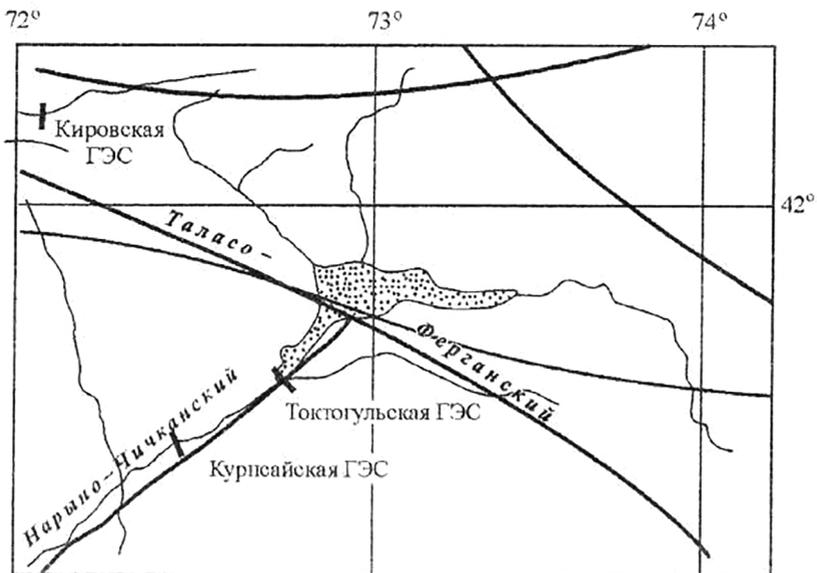


Рис. 3. Глубинные разломы в районе расположения каскада Нарынских ГЭС в Кыргызстане (по Крестникову и Нересову)

как правило, связано с узлами пересечений глубинных разломов первого порядка и представляет собой идеальное место для гео-динамических исследований. А развитые многофункциональные измерительные системы плотин делают их готовыми геофизическими полигонами.

Контроль устойчивости и прочности техноприродной системы «плотина — основание — водохранилище» обеспечивается путем систематических измерений ее общих перемещений (вертикальных, горизонтальных и угловых), деформаций, осадок берегов головной части водохранилища, так называемой «воронки оседания», параметров фильтрационного режима, напряжений в сооружении, раскрытия швов и трещин. На гидроузлах в сейсмичных районах ведутся геодезические наблюдения за тектоническими движениями на ближайших разломах и сейсмометрические наблюдения на плотинах. Ближайшие станции Федеральной службы сейсмических наблюдений (ФССН)

и Единой геофизической службы РАН обеспечивают контроль сейсмологической обстановки. В последние годы находит все более широкое применение система спутникового контроля за общими смещениями сооружений.

С точки зрения геодинамического влияния на сооружение большой интерес представляют деформации района створа, которые характеризуются осадками основания под плотиной вдоль створа, сжатием-расхождением и дифференцированными подвижками берегов, неравномерностью осадки в направлении течения, сдвиговыми смещениями в зоне контакта, в зоне тектонических нарушений под плотиной и в береговых примыканиях, изменением длины плотины по гребню. С этой целью в районе створа плотины и в сооружении оборудуется сеть геодезических знаков, включающая разбивочные оси, каркасную сеть фундаментальных реперов, системы триангуляции и трилатерации, светодальномерные створы между берегами, осадочные марки в головной части водохранилища и в нижнем бьефе в пределах воронки оседания, а также в нижних галереях плотины, на гребне, на массивах береговых примыканий, прямые и обратные отвесы по всей высоте сооружения с заглублением в основание. Наиболее ответственные швы в сооружении оснащаются трехосными шелемерами, трещины в бетоне – двух- или одноосными шелемерами. Система геодезических знаков устанавливается на бортах ближайшего разлома. Среднеквадратичная погрешность измерений осадок и горизонтальных смещений бетонных сооружений на скальных основаниях составляет не более 1 мм, по оплзням 10 мм, по обвалоопасным участкам до 2 мм.

Вертикальные смещения (осадки) вызываются деформированием основания под воздействием веса сооружения, воды в водохранилище, фильтрационного противодавления и геодинамического влияния. Последнее может проявляться как унаследованное движение, активированное эффектом Ребиндера и взвешиванием, а также блочными сейсмогенными подвижками при сильных сейсмических событиях, особенно в разломных и приразломных

зонах. Наиболее распространенный метод измерения осадок – нивелирование I класса, или, более точно, – «гидротехническое» нивелирование по специально оборудованным станциям для нивелировки в галереях бетонных плотин. Опорная высотная сеть такого нивелирования базируется на системе фундаментальных реперов, вынесенных за пределы воронки оседания в нижнем бьефе гидроузла. Допустимая среднеквадратичная ошибка для нивелирования I класса равна не более – 1 мм. При измерении относительных осадок гидротехническим нивелированием допустимая ошибка составляет 0,2–0,3 мм [Карлсон, 1984]. При контроле осадок марок на труднодоступных откосах применяется тригонометрическое нивелирование с помощью теодолитов, которое дает меньшую точность. В гидротехническом нивелировании, в пределах сооружений, широко используется гидростатическое нивелирование с помощью стационарных длинных гидравлически сообщающихся уровенных труб или сосудов, показания которых поддаются автоматизации. Точность отсчетов по гидростатическим нивелирам достигает 0,03 мм. Они же используются для измерения углов поворота или наклонов в поперечных галереях плотин.

Горизонтальные смещения в местной системе координат в зависимости от целей измерения могут контролироваться триангуляцией, трилатерацией, различными створными методами, способом вытянутых треугольников (СВТ), светодальномерами, системами прямых и обратных отвесов (ПО, ОО или сдвигомерами СГС), с помощью кварцевых или титановых мерных штанг или стержней с индикаторами часового типа.

Горизонтальные смещения при тектонических движениях в ближайших к створу разломах фиксируются триангуляцией, как, например, на разломе Калудалкал в нижнем бьефе Чиркейской ГЭС (рис. 4) или трилатерацией, как на Кантегирском разломе в верхнем бьефе Саяно-Шушенской ГЭС. Иногда им может предшествовать неожиданная остановка смещений (консолидация перед срывом напряжений), как это было на разломе Калудалкал перед Курчалойским землетрясением 11 октября 2008 г.

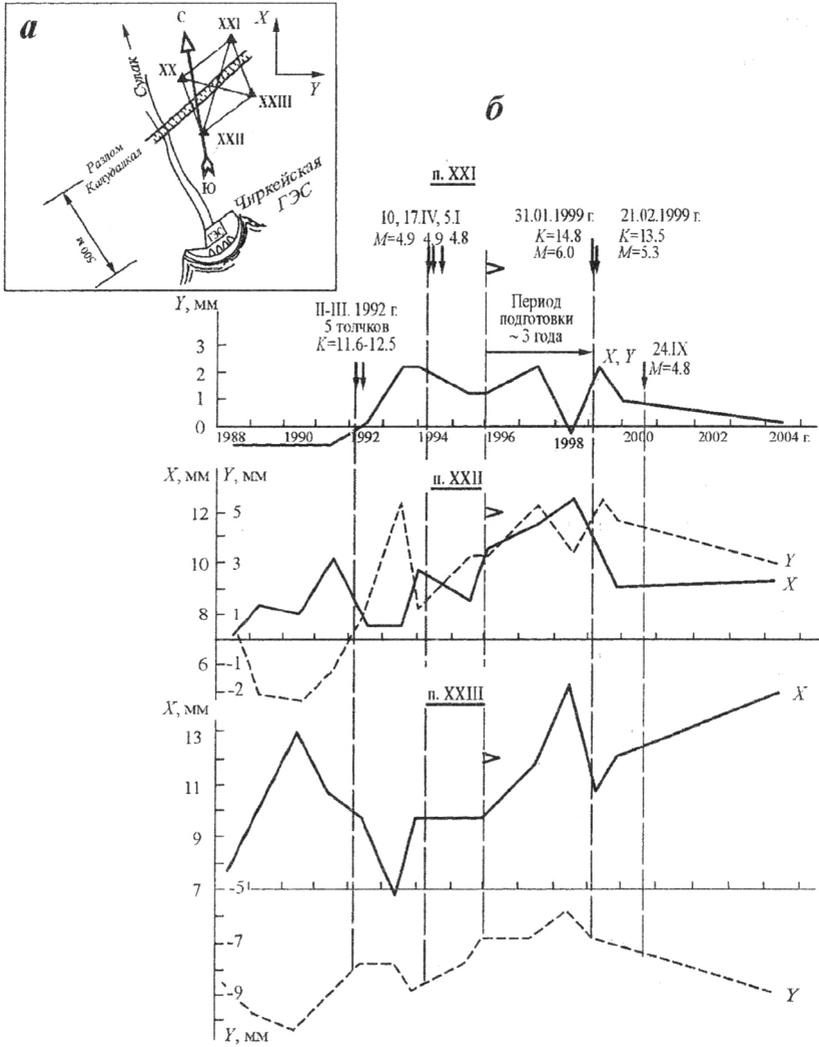


Рис. 4. Деформационные предвестники землетрясений 1992, 1994 и 1999 г. на разломе Калудалка в нижнем бьефе Чиркейской ГЭС:
 а – схема геодезической сети и осей координат смещений,
 б – смещения пунктов по бортам разлома от тектонических движений относительно п. XX

Генеральные смещения сооружения в целом измеряются высокоточной полигонометрией от фундаментальных реперов государственной триангуляции (так называемая «каркасная съемка»), спутниковой геодезией или триангуляцией в рамках локальной системы от неподвижных реперов, расположенных за пределами влияния сооружения и водохранилищ.

В галереях гравитационных плотин с прямолинейной осью широко распространены струнные створы, базирующиеся на фундаментальных знаках в береговых штольнях или глубоких якорях обратных отвесов, которые можно считать неподвижными.

Относительные горизонтальные смещения, как правило, измеряются обратными и прямыми отвесами по координатомерам с точностью 0,05 мм (рис. 5). Взаимные горизонтальные перемещения частей плотины, разделенных конструктивными швами, контролируются разного типа щелемерами (одноосные, трехосные, закладные струнные преобразователи). Раскрытие трещин измеряется с помощью маяков, щупов, микрометров.

Фильтрационный режим и способы его контроля в створах плотин представляют наибольший интерес с точки зрения изучения геодинамических процессов. Флюидная составляющая двухфазной геологической среды является наиболее подвижной и чувствительной к изменениям напряженного состояния. Ламинарный поток фильтрации Пуазейля и более редкий случай турбулентного потока Блазиуса имеют расход, зависящий в третьей степени от величины раскрытия трещин, или в общем виде

$$q = f\{K(n, e^3)\}i,$$

где n — вязкость флюида, e — раскрытие трещины, i — градиент напора.

Увеличение раскрытия трещины вдвое приводит к увеличению удельного расхода фильтрации в восемь раз, и наоборот. Этим и объясняется высокая чувствительность фильтрационного расхода к напряжениям в массиве горных пород, от которых зависит раскрытие трещин.

Разветвленные дренажные и пьезометрические сети плотин позволяют контролировать большой объем вмещающего геоблока по нескольким параметрам — по дебиту дрен, фильтрационному расходу и напору, градиенту напора, температуре дренажных вод, их химическому составу, ориентации векторов напряжений по направлению изменения дебита дрен. Системы контроля фильтрационных расходов построены так, что можно разделять суммарный расход на составляющие части — расход через основание в русловой части в берегах (обходная фильтрация) и через бетон плотины, измеряемый в мерных водосливах или лотках. Для специальных исследований применяется объ-

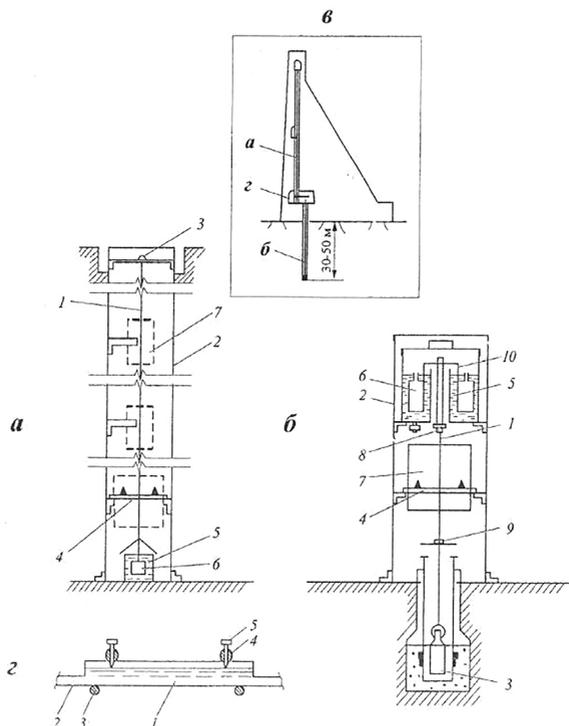


Рис. 5. Схемы прямого (а) и обратного (б) отвесов, гидростатического нивелира (з) и размещения их в плотине (в)

емный метод измерения дебита отдельных дрен или источников тарированными мерными емкостями по секундомеру с одновременным измерением температуры и отбором проб дренажных вод для химического анализа. Этот метод наиболее точен и информативен, он позволяет учитывать зоны влияния отдельных тектонических нарушений, локализовать особенности гидрогеодинамического режима. Точность измерения дебита отдельных дрен и каптированных источников составляет 0,01–0,1 л/с, температуры воды – 0,1 °С, химического состава – 0,1 мг/л. По изменениям суммарного фильтрационного расхода или производительности насосов откачки в случае нарушения их нормальных связей с УВБ можно судить об изменениях поля напряжений во вмещающей геологической среде.

Для измерения уровня грунтовых вод, напоров фильтрационного потока и эпюры взвешивающего противодавления под плотиной, используются пьезометры, расположенные по створам вдоль течения на контактах сооружения с основанием и в глубине скального основания перед цементационной и дренажной завесой и за ними (рис. 6). По показаниям пьезометров определяется взвешивающее давление на подошву плотины, гидродинамические градиенты и их изменения под влиянием изменений поля напряжений в основании. При увеличении сжимающих напряжений происходит частичное или полное смыкание трещин с выдавливанием депонированной воды и соответствующим изменением дебита дрен и уровня в пьезометрах. Этот механизм убедительно доказан экспериментами в основании поворотного круга Красноярского судоподъемника [Колосов, 1995]. При наезде судовозной камеры весом 8500 т на поворотный круг пьезометры под фундаментами этого круга повышали уровень на 16–18 см, аналогичный эффект наблюдается при подготовке сильных землетрясений.

Специфика этого средства измерения заключается в том, что он фиксирует давление воды в данной точке. Поэтому наиболее информативными являются пьезометры, водоприемники которых пересекают трещины, гидравлически связанные с тектоническими нарушениями, или контакт скала–бетон, где высока

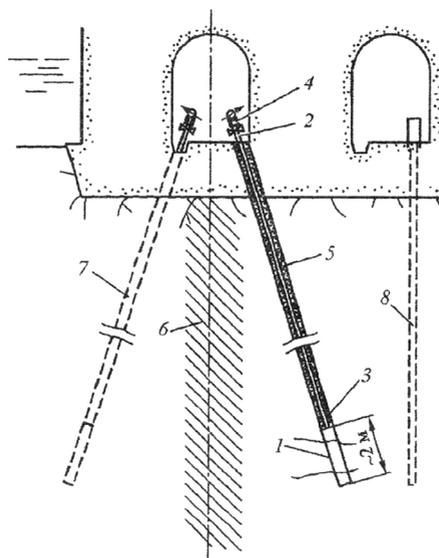


Рис. 6. Схема глубинного пьезометра:

- 1 – скважина (водоприемник), 2 – труба, 3 – тампон,
 4 – оголовок пьезометра с краном и манометром,
 5 – зацементированное затрубное пространство, 6 – цементационная
 завеса, 7 – пьезометр перед цементационной завесой, 8 – дренаж

вероятность раскрытия трещины по границе разномодульных сред. Мерные водосливы и лотки, объединяющие сеть дренажных скважин, позволяют измерять суммарные фильтрационные расходы через определенный объем пород в основании и по берегам и в целом по сооружению.

В контролируемых параметрах фильтрационного потока весьма полезную информацию может содержать картина изменения температуры дренажных вод из глубоких дренажных скважин. На фоне стабильного температурного режима фильтрации из придонных слоев водохранилища легко различить аномальные импульсные повышения температуры при сейсмических событиях. Глубинная природа таких аномалий может быть подтверждена одновременным химическим анализом проб дренажных

вод из этих же скважин. Геохимический анализ выполняется штатными химическими лабораториями ГЭС методом титрования по содержанию ионов кальция и магния Ca^{2+} , Mg^{2+} , хлора Cl^- , сульфатов SO_4^{2-} , суммы ионов натрия и калия ΣNaK , по показаниям рН, жесткости $\text{Ж} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, щелочности HCO_3^- и содержанию углекислого газа CO_2 м/л. К сожалению, у этих лабораторий нет возможности контролировать emanацию радона и гелия, которые весьма перспективны как индикаторы подготовительных процессов землетрясений.

Таким образом, контроль фильтрационного режима плотины позволяет получать информацию о геодинамических процессах в створе плотины по пяти параметрам: дебиту дрен, фильтрационному расходу, гидродинамическому напору, температуре и химическому составу дренажных вод. Первые два показателя позволяют судить также об изменениях напряжений в массиве горных пород основания. При непрерывном мониторинге этих показателей могут быть получены и количественные корреляции. Так, РЦСС при НАН Азербайджана (Р. Х. Керимова) разработан автоматизированный метод СФД прогноза землетрясений, основанный на распознавании аномалий в химии флюидов на завершающем этапе реализации сейсмического события. Достоверность прогноза 70–90 %.

Большое значение имеют результаты визуальных наблюдений за фильтрационным режимом в основании плотины — замеченные появления новых источников или их исчезновение, пульсация дрен и ее изменения, мутность дренажных вод, вынос твердых частиц, следы выщелачивания на бетонных поверхностях.

Использование результатов измерений на плотине должно сопровождаться обязательным анализом сейсмометрических данных материалов сейсмологических наблюдений ближайших сейсмостанций ЕГС РАН. При наличии на реке каскада плотин или близко расположенных плотин на соседних реках целесообразно сравнить результаты наблюдений (при обнаружении аномалий). Содержание информации, которую можно получить с региональных сейсмостанций, дано в приложении 2.

Наиболее массовыми приборами в теле бетонных плотин являются струнные преобразователи температуры (ПТС), линейных деформаций (ПЛДС, рис. 7), линейных перемещений (ПЛПС) и телетензометры различного типа и назначения. Прибор основан на свойстве струны однозначно изменять частоту собственных колебаний при изменении напряжения. Зависимость между частотой и напряжением «идеальной струны» выражается формулой

$$\sigma = 4\rho l^2 f^2,$$

где f – частота колебаний струны в Гц, l – длина струны, см, σ – напряжение струны, кг/см², ρ – плотность материала струны, кг·сек²/см⁴.

При изменении частоты от f_1 до f_2 напряжения изменяются по следующей зависимости:

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 = 4\rho l^2 (f_2^2 - f_1^2).$$

Напряжение в бетоне пропорционально отношению модулей упругости бетона и струны K (Закон Гука):

$$\Delta\sigma_6 = 4\rho l K (f_2^2 - f_1^2),$$

что и является искомой величиной измерений.

Приборы ПЛДС-400 (телетензометры) закладываются в бетон сооружения, в скалу основания и используются как для работы на растяжение, так и на сжатие. В первом случае диапазон измерения относительной деформации составляет от минус $50 \cdot 10^{-5}$ до $200 \cdot 10^{-5}$, а во втором – от минус $200 \cdot 10^{-5}$ до $50 \cdot 10^{-5}$ единиц относительной деформации. Верхняя граница диапазона измерения абсолютной деформации у ПЛДС-400, предназначенного для работы в условиях растяжения, не превышает 0,8 мм. Предел допускаемой основной погрешности составляет плюс-минус $5 \cdot 10^{-5}$ единиц относительной деформации. Тензометры устанавливаются в бетоне по всем направлениям тензора напряжений розеткой с прибором в «конусе», который фиксирует свободные объемные деформации бетона в период гидратации цемента.

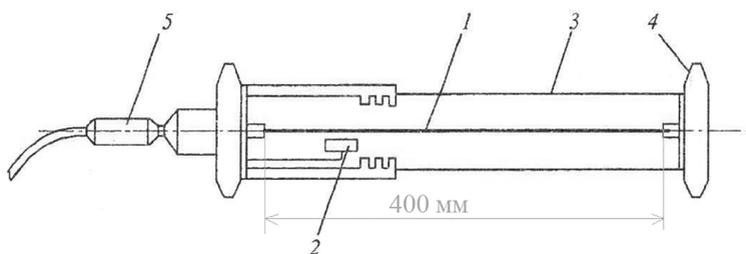


Рис. 7. Схема струнного преобразователя линейных деформаций (телетензометра) ПЛДС-400:
 1 – струна, 2 – электромагнитная катушка, 3 – корпус,
 4 – анкерный фланец, 5 – ввод кабеля

При обработке измерений от статических нагрузок собственные напряжения бетона в конусе вычитаются из измеренной величины. При динамических нагрузках (сейсм) показания приборов в конусах можно не учитывать.

Применение преобразователей линейных деформаций с большой базой от 2 до 5 м позволяет получить осредненные деформации на контролируемом прибором участке неоднородного скального массива и в зоне бетона с трещинами. Диапазоны измерения абсолютной деформации для деформометров ПЛДС-2000 и ПЛДС-5000 составляют, соответственно, от минус 4,0 до 1,0 и от минус 10,0 до 2,5 мм.

Динамические нагрузки фиксируются сейсмоприемниками СКМ-3, СМ 4-Б и других типов, автоматизированными деформометрами и отвесами, а также ближайшими сейсмическими станциями Геофизической службы РАН. На наиболее ответственных сооружениях I класса имеются информационно-вычислительные центры с банком данных натуральных наблюдений по всем системам, с программами обобщения, анализа и диагностики.

Щелемерные наблюдения по закладным одно-, двух- и трехосным щелемерам на гранях, стенках галерей или дистанционным струнным ПЛДС в бетоне имеют целью контролировать состояние строительных, конструктивных швов и трещин в теле плотины, состояние контактов плотины с основанием, взаимных

смещений частей сооружения (осадок) по швам и, таким образом, — общую схему статической работы плотины с учетом раскрытия швов и трещин. Как наиболее слабые места в сооружении, они чутко реагируют не только на температуру, но и на динамические нагрузки, поэтому изменение их раскрытия и взаимных смещений при постоянных УВБ и температуры воздуха позволяют судить о геодинамическом влиянии и векторе динамических воздействий.

Представление о количестве телеметрической КИА в отечественных плотинах дает таблица 5 (по состоянию на 1985 г.).

Измерения растягивающих напряжений в арматуре осуществляется преобразователями силы ПСАС для стержней диаметром 20, 28 и 40 мм в диапазоне усилий 80–320 КН с точностью 2 %. По наблюдениям, на Кировской плотине обнаружен активный отклик этих приборов на сейсмические воздействия, ориентированный по направлению продольной сейсмической волны.

Выводы всех струнных датчиков концентрируются в коммутаторах и опрашиваются с помощью приборов вторичного контроля — цифровых периодометров ПЦП-1 с батарейным и сетевым питанием. В последнее время для этой цели применяется тестер ТСД-16, разработанный ВНИИГ, который в автоматическом режиме измеряет частоту колебания струны, омическое сопротивление катушки для определения температуры и диагностирует техническое состояние телетензометра. Память прибора позволяет сохранять до 4000 измерений и через компьютер передавать их в файл.

Все перечисленные системы, приборы вторичного контроля и датчики стандартизированы и регулярно проходят метрологический контроль. Количество и типы КИА на каждой плотине перманентно изменяются по мере исчерпания ресурса и появления новых средств измерения. Измеряемые параметры сравниваются с критериальными значениями, а при появлении аномалий проводятся специальные исследования с привлечением авторов проекта, ученых НИИ и специалистов.

Таблица 5

Количество струнных датчиков в крупных плотинах РФ

Плотина	Термометры (ПТС)	Тензометры (ПЛДС)		Щелемеры (ПЛПС)	Армат. динамометры (ПСАС)	Пьезодинамометры (ПДС)	Скальн. деформометры (ПЛПС)	Прочие	Итого
		Закл.	накл.						
Братская	640	1209	117	136	64	149	–	40	2355
Усть-Илимская	779	1752	20	235	105	70	–	33	2994
Красноярская	387	700	280	24	96	25	3	23	1666
Зейская	357	763	65	85	74	12	6	14	1376
Чиркейская	450	935	–	86	14	43	45	–	1573
Саяно-Шушенская	562	762	149	73	160	127	50	–	1883

Все гидроэлектростанции I и II класса капитальности имеют службы или лаборатории натуральных наблюдений (мониторинга), инструкции и правила проведения измерений, программы обработки данных, критериальные значения измеряемых параметров, предусмотренных проектом, персональные ЭВМ и банк данных.

Мониторинг геодинамического влияния на плотину начинается с обязательной оценки общего статического напряженно-деформированного состояния сооружений и основания, которое служит фоном для ожидаемых геодинамических воздействий. Как правило, эту оценку выполняет эксплуатационный персонал ГЭС, что делает использование больших плотин в качестве геофизических полигонов весьма продуктивным.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Организационные основы

Возникновение Содружества независимых государств разрушило Единую сеть сейсмических наблюдений и геодинамических полигонов СССР. При этом в наиболее трудном положении оказалась Российская Федерация, где плотность сейсмостанций, количество геофизических и прогностических геодинамических полигонов были значительно меньше, чем, например, в республиках Средней Азии или Закавказья. Положение усугубляется недостатком средств на содержание действующих сейсмостанций, и особенно станций в отдаленных малообжитых регионах.

Вместе с тем опасность сильных землетрясений и катастрофических геодинамических явлений на территории России достаточно высока, о чем свидетельствуют, например, недавние землетрясения на Сахалине, Курилах, в Дагестане, на Алтае, в Тыве, в Хакасии. К зонам высокой сейсмической опасности относятся Северный Кавказ, Камчатка, Сахалин, Приморье, Прибайкалье и некоторые другие районы России. В подобных условиях необходима модернизация существующей государственной системы сейсмологических наблюдений. Учитывая сложившуюся ситуацию, Академия наук Российской Федерации совместно с Министерством по чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий катастроф (МЧС) выступили с предложением об объединении сейсмологических и геофизических служб различных министерств и ведомств в единую Федеральную систему сейсмологических наблюдений (ФССН).

Это предложение было поддержано Правительством Российской Федерации, которое своим Постановлением от 11 мая 1993 г.

№ 444 «О Федеральной системе сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений» включило в федеральную систему сейсмологических наблюдений:

- геофизическую службу Российской академии наук;
- сейсмическую службу Министерства обороны Российской Федерации;
- службу сейсмических и геодинамических охранных сетей наблюдений Министерства Российской Федерации по атомной энергии;
- службу геодинамических наблюдений Министерства энергетики Российской Федерации (СГН Минпромэнерго РФ);
- службу мониторинга геологической среды Комитета Федерации по геологии и использованию недр;
- службу инженерно-сейсмометрических наблюдений Государственного Комитета Российской Федерации по вопросам архитектуры и строительства;
- службу контроля деформаций земной поверхности Федеральной службы геодезии и картографии России.

Координация работ по обеспечению функционирования и развития ФССН возложена на межведомственную комиссию по сейсмическому мониторингу, созданную совместным решением МЧС России, министерств, ведомств и РАН, службы которых входят в ФССН. Общее руководство и контроль за реализацией программы «Развитие ФССН» возложены на МЧС России, а обеспечение функционирования служб, входящих в ФССН, – на соответствующие министерства, ведомства и РАН.

Главными задачами ФССН являются обеспечение оперативных прогнозов землетрясений, оповещение центральных и местных органов исполнительной власти о прогнозируемых геодинамических опасностях, организация банка сейсмологических и геодинамических данных, разработка нормативных документов по вопросам защиты населения, объектов и территории от воздействия землетрясений и других катастрофических природных явлений.

В настоящее время все сейсмометрические службы страны объединены под руководством Единой геофизической службы РАН.

Основная цель СГН Минэнерго России – выполнение комплекса мероприятий по обеспечению безопасности населения и объектов ТЭК, по снижению возможного ущерба при эксплуатации этих объектов, связанного с различными геодинамическими процессами и явлениями, и в первую очередь с землетрясениями. Для достижения этих целей перед СГН ставятся следующие важнейшие задачи:

- организация и проведение комплексных режимных наблюдений за геодинамической обстановкой в пунктах расположения крупных и экологически опасных объектов ТЭК;

- контроль за состоянием и поведением сооружений ТЭК при сейсмических и других геодинамических воздействиях;

- контроль за влиянием, оказываемым строительством и эксплуатацией объектов ТЭК, на геодинамический и сейсмический режим районов расположения этих объектов;

- разработка рекомендаций по предотвращению и снижению ущерба от аварий и катастроф на объектах ТЭК, связанных с землетрясениями и опасными геодинамическими явлениями: тектоническими подвижками, обвалами и оползнями, провалами и обрушениями, горными ударами и другими;

- участие в разработке нормативно-технических документов по проектированию и эксплуатации объектов ТЭК в районах повышенной сейсмичности и геодинамической активности.

В рамках описанной организационной структуры и сложившихся экономических условий Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН в содружестве с ЕГС РАН и службами мониторинга ГЭС избрал вынужденный и, как оказалось впоследствии, полезный путь проведения исследований с помощью существующих и действующих измерительных систем плотин при активной поддержке руководства и эксплуатационного персонала гидроэлектростанций. Здесь уместно вернуться к истории возникновения и постановки задачи.

2.2. История вопроса и постановка задачи

Истоки принятой в данном исследовании методики лежат в истории натуральных наблюдений на больших отечественных плотинах и восходят к временам Днепрогэса, где впервые отработывался комплекс многофункциональных измерительных систем для всестороннего контроля состояния этих ответственных сооружений. Анализ результатов таких наблюдений на многих отечественных плотинах нередко обнаруживал аномалии, трудно объяснимые с позиции гидротехнической науки. В большинстве случаев они касались характера взаимодействия сооружения с вмещающей геологической средой и представляли собой контактные задачи. Так, в 1963 г. на плотине Братской ГЭС [Эйдельман, 1970] струнными деформометрами на контакте бетона с основанием под напорной гранью было зафиксировано раскрытие этого контакта и разуплотнение скалы, тогда как по проектным расчетам в этой зоне должны быть сжимающие напряжения.

Необъяснимые на основе прежнего опыта скачки в показаниях скальных деформометров отмечались в основаниях Ингурской, Токтогульской, Курпсайской, Чиркейской и Саяно-Шушенской плотин. В период наполнения водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС пьезометры в основании иногда показывали уровни существенно выше уровня верхнего бьефа, что противоречит законам гидростатики. Трудно объяснимые флуктуации, не связанные с изменениями УВБ и температуры воздуха, наблюдались в показаниях отвесов, дебитах дрен, гидростатических нивелиров, щелемеров и других типов КИА. Независимо от УВБ изменялись отметки реперов в нивелирных ходах воронки оседания на Зейской, Саяно-Шушенской, Токтогульской и других ГЭС. Первые попытки связать эти аномалии с геодинамическим влиянием, в частности с сейсмическими событиями, были сделаны авторами в 1991 г. методом ретроспективного анализа показаний более 400 датчиков различного типа и назначения на 11 отечественных плотинах. С этой целью изучались отчеты ВНИИГ, Гидропроекта, НИИ энергетических сооружений, Гид-

роеспецпроекта и других институтов, лабораторий натуральных наблюдений ГЭС совместно с региональными каталогами сейсмических событий по сборникам «Землетрясения в СССР».

Задача заключалась в том, чтобы определить наличие отклика измерительных систем плотин на сильные землетрясения и медленные движения земной коры и выделить наиболее чувствительные к геодинамике средства измерения. Можно было утверждать априори, что такой отклик существует. Известно [Николаев, 1988], что в новейшей тектонике и динамике литосферы гидрографическая сеть рек и озер как предмет исследования занимают особое место. Благодаря тому, что русла рек тяготеют к тектоническим нарушениям или совпадают с ними, на земной поверхности выделяются крупные геоблоки, эрозионные системы, структурные образования, тектонические узлы. Именно чувствительность разломных долин к тектоническим смещениям способствовала развитию структурно-геоморфологического метода изучения новейших движений, а следовательно, определяет и чувствительность плотин к геодинамическим процессам.

Практически все отечественные высокие плотины расположены в зонах повышенной тектонической активности или близко к ним (рассматриваются плотины бывшего СССР с максимальной строительной высотой от 60 м и более (рис. 1)). Например, Чиркейская ГЭС встроена в Сулакский разлом, Токтогульское водохранилище расположено в депрессии на пересечении Таласо-Ферганского и Нарыно-Чичканского разломов – главных сейсмогенераторов Тянь-Шаня (рис. 3). Курпсайская плотина расположена на Нарыно-Чичканском разломе, проходящем по руслу р. Нарын. Створ Саяно-Шушенской ГЭС расположен вблизи от Северо-Борусского разлома первого порядка и оперяющего его Кантегирского разлома. Правое крыло Ингурской плотины размещается над разломом, оперяющим Ингиришский глубинный разлом, Зейская ГЭС постоянно испытывает сейсмическое влияние близкой границы Алдано-Станового и Амурского геоблоков, разлом второго порядка проходит по правому берегу створа Бурейской ГЭС и т. д.

Высокие плотины с большими водохранилищами, являющиеся сами по себе наиболее мощными техногенными вторжениями в земную кору, оказываются, кроме того, в наиболее чувствительных местах геоблочной иерархии. При этом они активно воздействуют на ближайшие тектонические узлы путем водонасыщения разломов, сезонного изменения нагрузки от веса воды в водохранилище, работы водосливов, переменных температурного и гидродинамического режимов. Это вызывает ответную реакцию вмещающей геологической среды, которую должны фиксировать измерительные системы плотин. Главная трудность ретроспективного анализа заключалась в различных регламентах сейсмометрических и статических измерений. При совмещении временных рядов непрерывных сейсмометрических и дискретных статических измерений на плотинах часто обнаруживались невосполнимые провалы в графиках измерений на плотинах в периоды сильных сейсмических событий. Тем не менее эти трудности частично преодолевались благодаря длинным временным рядам (35–50 лет), большому количеству сейсмособытий и большому количеству многофункциональных средств измерения на плотинах с разными интервалами отсчетов. Заметим, что по количеству закладной КИА отечественные плотины почти на порядок превосходят зарубежные.

При анализе отклика плотин на сейсмические события в графиках измеряемых параметров выделялись два временных интервала: время появления предвестника землетрясения « T » как аномалии по отношению к изменению основных нагрузок — гидростатического давления и температуры воздуха — и время от изменения тренда графика до сейсмического события, условно названное «прогноznым временем T_p ». Это соответствует принятой в сейсмологии методике определения предвестника по схеме «подъем — пик — спад — толчок». Там, где это было возможно по количеству статистического материала, сделаны попытки поиска корреляции между временем появления предвестника и параметрами землетрясений.

В результате ретроспективного анализа было доказано наличие отклика измерительных систем плотин на сильные сейсмические события и их подготовительный период, выявлена наиболее чувствительная к геодинамике группа средств измерений. В 1992 г. вышла первая публикация по этой теме [Марчук, Савич, 1993], одобренная вице-президентом РАН академиком Н. П. Лаверовым, в том же году опубликована статья А. Марчука в журнале *Water Power & dam construction*. В 1992 г. поданы заявки на изобретения способов прогноза землетрясений и регистрации тектонических движений, по которым в 1996 г. выданы соответствующие патенты [Марчук, Дурчева, Савич и др., 1996].

2.3. Модернизация измерительных систем плотин

Геодинамические воздействия в явном виде впервые инструментально зафиксированы на плотине Саяно-Шушенской ГЭС при наполнении водохранилища в 1983–1984 гг. с помощью отвесов частыми ручными отсчетами (М. В. Иванов). Полученные скачки в измеряемых параметрах смещений и фильтрационного режима вступили в противоречие с дующими в то время правилами, требующими «сглаживания» скачков, и совпали по времени с датами землетрясений. После Спитакского землетрясения были введены в действие новые правила технической эксплуатации электростанций (ПТЭ), требующие опроса всех видов КИА после каждого сейсмического толчка интенсивностью 5 баллов. Возникла необходимость автоматизации измерительных систем для контроля быстропротекающих геодинамических процессов в режиме реального времени.

Центр «Сибгеоинформ» (г. Новосибирск) Федеральной службы геодезии и картографии РФ создал информационно-измерительную систему применительно к геодезическим наблюдениям на Саяно-Шушенской ГЭС. Основная цель создания такой системы – формирование банка геодезических данных, дающего возможность:

- уменьшить трудоемкость геодезических наблюдений;
- анализировать полученную информацию с возможностью построения модели статической работы сооружения и его взаимодействия с окружающей средой;
- использовать получаемую геодезическую информацию при разработке комплексной системы оценок риска возникновения аномальных геодинамических процессов в районе створа гидроузла;
- оперативно использовать получаемую геодезическую информацию для прогностических целей и принятия решений в критических ситуациях.

Структурно с точки зрения используемых типов геодезической КИА и очередности ввода в эксплуатацию система подразделяется на подсистемы: обратные отвесы, прямые отвесы, сети вытянутых треугольников, пяты арок, щелемеры, гидростатические нивелиры (рис. 8). В состав комплекса технических средств входят измерительные преобразователи, линии связи, управляющий вычислительный комплекс – компьютер и устройство связи с объектом. Этот комплекс организован таким образом, что позволяет выбранной номенклатурой датчиков реализовать наибольшее число функций системы при помощи серийных комплектующих изделий, минимизировать состав дополнительной аппаратуры и суммарную длину линий связи, обеспечить необходимую точность и помехозащищенность информационных линий, эксплуатировать систему в обычных рабочих условиях.

Математическое обеспечение системы представляет собой набор моделей и алгоритмов, объединяющих технические средства для работы в режиме реального времени, реализующих автоматический ввод информации с датчиков, интерпретацию измерений, вывод информации в форме документов и видеogramм. Обработка входной информации включает цифровое преобразование сигналов датчиков линейных смещений, вычисление смещений, уравнивание геодезических сетей, регистрацию результатов математической обработки на машинных носителях. В интерпретацию результатов измерений входят краткосрочный прогноз развития деформаций, сравнение прогноза с допусти-

мыми нормами, определение срока выполнения следующего цикла измерений.

В настоящее время уже накоплен определенный опыт эксплуатации САК ГС на Саяно-Шушенской и Зейской ГЭС, позволивший получить ряд важных, качественно новых результатов в натурных исследованиях статической и динамической работы высоких бетонных плотин.

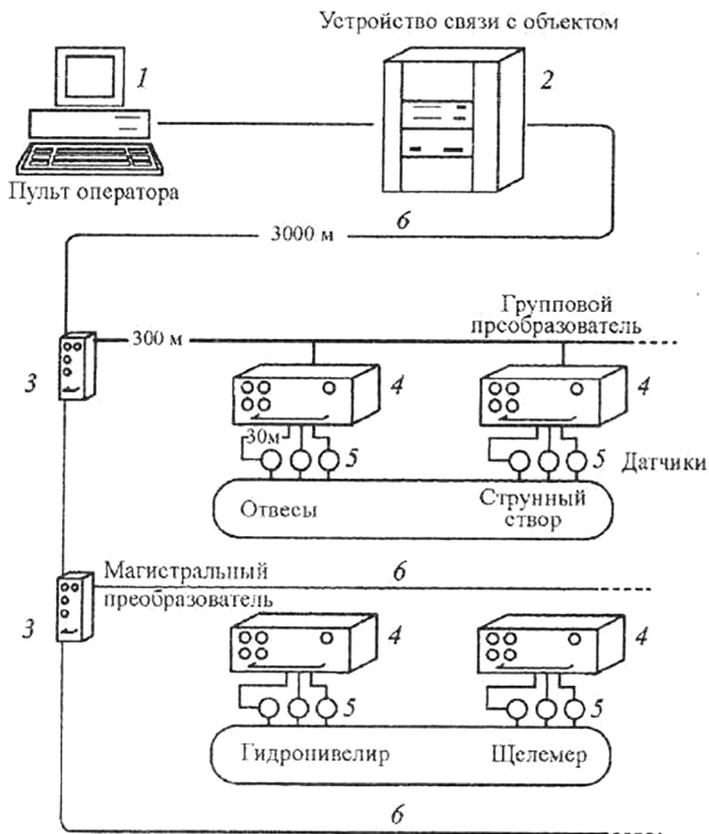


Рис. 8. Схема информационно-измерительной автоматизированной системы геодезических наблюдений за состоянием гидротехнических сооружений «Сибгеоинформ» (САК ГС). Пояснения в тексте

На Саяно-Шушенской ГЭС система САК ГС эксплуатируется на обратных отвесах трех секций 18, 33 и 45 с 1989 г. Она введена в действие за год до достижения нормального подпорного уровня водохранилища. В связи с пионерным характером освоения этой системы параллельно снимались ручные замеры по штатному регламенту, что позволило выявить степень надежности автоматики, а также достоинства и недостатки системы. Главное достоинство проявилось в том, что впервые были записаны остропиковые обратимые смещения от землетрясений в приконтактной зоне основания. При ручных замерах указанные флуктуации оказались сглаженными, действительные параметры смещений искажены, их временная привязка «смазана». Способность фиксировать упругие обратимые деформации от динамических нагрузок с помощью САК ГС была продемонстрирована в июле 1992 г., когда при форсированном наполнении водохранилища (до 2 м/сут) в мае-июне произошла резкая задержка подъема уровня, вызвавшая упругий отпор породы береговых примыканий и аномальные кратковременные смещения плотины в верхний бьеф, навстречу гидростатическому давлению. Обнаруженные таким образом деформации приконтактной зоны скального основания показали, что слабые возбужденные землетрясения не так уж безобидны в условиях высоконапорного и высокоградиентного фильтрационного потока. Если амплитуда упругих колебаний при слабых землетрясениях измеряется микронами даже на гребне, то обратимые смещения основания измеряются целыми первыми миллиметрами. Была показана также необходимость ограничения скорости подъема уровня водохранилища, для исключения значительных знакопеременных деформаций береговых упоров плотины.

Этими первыми наблюдениями было также установлено наличие неизвестных ранее гидротехнической науке длиннопериодных низкочастотных волн деформаций системы «плотина-основание», занимающих промежуточное место между статическими и динамическими. Этот класс деформаций нуждается в специаль-

ном изучении, которое невозможно без использования системы САК ГС.

В период опытной эксплуатации проявились и недостатки системы, например повышенная чувствительность к техногенным влияниям (долив воды в поплавоквые камеры, близкие механические воздействия и т. п.).

На Зейской ГЭС система САК ГС кроме обратных отвесов контролирует струнный створ в галерее на отм. 232 м и два щелемера в наиболее активных межсекционных швах плотины. К сожалению, здесь произошла длительная задержка между монтажом и вводом в действие системы, что отразилось на качестве ее работы, особенно по струнному створу. Тем не менее уже в период наладочных работ выявилось еще одно важное достоинство системы – возможность одновременного или близкого к таковому опроса большого числа точек. На рис. 9 представлена картина относительных смещений секций вдоль створа, измеренных в период наладочных работ после землетрясений энергетического класса $K = 6-9$. На графиках четко видны максимумы горизонтальных смещений отдельных секций в зоне руслового разлома, что негативно отражается на противофильтрационных уплотнениях межсекционных швов.

С учетом полученного опыта модернизируется система отвесов на Чиркейской ГЭС с новым поколением датчиков. Требуют совершенствования и сейсмометрические наблюдения на плотинах. Лишь в последние годы были установлены сейсмоприемники на Красноярской, Зейской и Токтогульской ГЭС, обновляется аппаратура на Чиркейской ГЭС. В 2012 г. на Чиркейской ГЭС вместо старой аналоговой системы в ждущем режиме установлена инновационная сейсмологическая система мониторинга плотины, объединяющая инженерно-сейсмометрические и сейсмологические наблюдения с использованием одних и тех же датчиков [Гамзатов Т. Г., Саидов М. А., Баксараев М., Капустян Н. К., Антоновская Г. Н., 2014].

При отсутствии или недостаточном количестве станций региональной сети целесообразно использовать многоканальные

переносные цифровые сейсмостанции СП-001М ЦСГНЭО с малыми габаритами и массой, удобные для труднодоступных и горных районов. Компактный инженерно-сейсмометрический комплекс создан ВНИИГом для Иркутской и Ирганайской ГЭС.

Для сооружений II и III класса капитальности можно рекомендовать компактные сейсмоприемники СМ-4Б ОКБ ИФЗ с сейсмокомплексом «Удар-2», регистрирующих ускорение по одному или трем каналам. Достоинством прибора СМ-4Б является возможность получения сигнала тревоги за 15–20 секунд

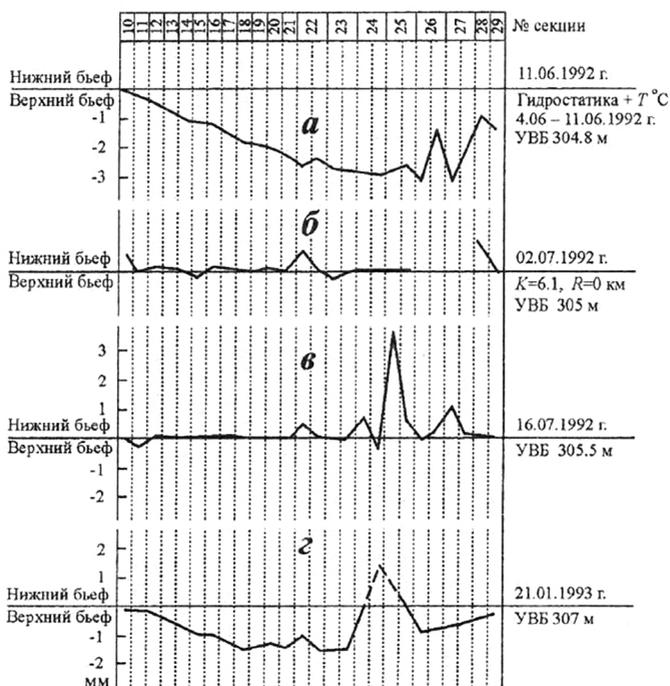


Рис. 9. Относительные горизонтальные смещения секций плотины Зейской ГЭС на отм. 232 м по струнному створу САК ГС в условиях нормальной эксплуатации при УВБ 304,8 м (а), через 3 сут. после толчка $K = 6,1$, $R = 0$ км УВБ 305 м (б), через 1 сут. после толчка $K = 8,7$, УВБ 305,5 м (в), через 2 сут. после толчка $K = 8,8$ УВБ 307 м (г)

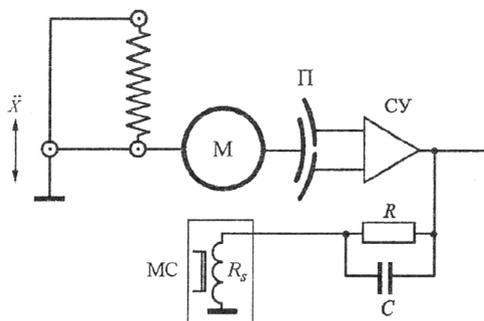


Рис. 10. Схема устройства электронного сейсмометра СМ-4Б ОКБ ИФЗ. Пояснения в тексте

до прихода разрушительной волны сильного землетрясения. По этой причине СМ-4Б может быть установлен и на плотинах I класса в составе трехкоординатного сейсмометрического комплекса, как это сделано на Зейской ГЭС.

Рисунок 10 поясняет принцип действия электронного сейсмометра СМ-4Б. Электронный сейсмометр, работающий в режиме акселерометра, представляет собой механический маятник «М», снабженный емкостным преобразователем «П» относительно перемещения маятника в сигнал электрического тока, часть которого с выхода системы усиления «СУ» ответвляется в цепь отрицательной обратной связи (R, C). Попадая в катушку R_s магнитной системы «МС», ток оказывает силовое воздействие на маятник, формируя таким образом амплитудно-частотную характеристику типа «акселерометр», столбообразную по отношению к ускорению грунта в диапазоне частот 0,03–10 Гц с коэффициентом преобразования 0,8 $\text{с}^2/\text{м}$.

В целях повышения качества и оперативности контроля фильтрационного режима на Токтогульской ГЭС 24 пьезометра оборудуются цифровыми датчиками с выводом на ПК, 60 пьезометров – электронными датчиками уровня с переносным считывающим устройством (ПСУ). На 8 водомерных постах установлены датчики непрерывной записи расходов, информация с которых также снимается ПСУ.

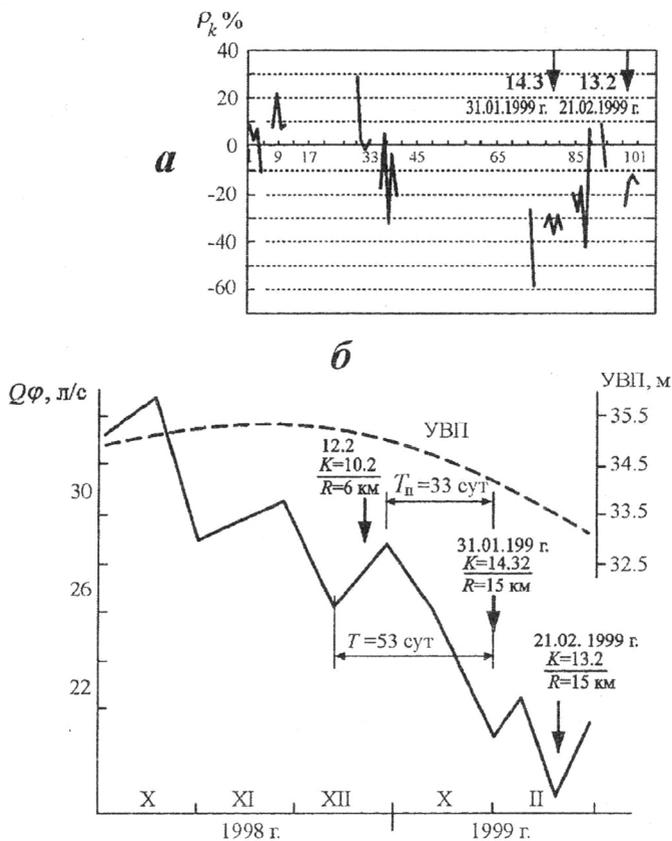


Рис. 11. Синхронная идентификация предвестников Дубкинского землетрясения 31.01.1999 и первого его афтершока 21.02.1999 методом измерения электросопротивления горных пород ($r_k \%$) и флуктуаций суммарного фильтрационного расхода в створе плотины Чиркейской ГЭС

Опыт работы на Чиркейской и Саяно-Шушенской ГЭС показал эффективность комплексирования наблюдений по измерительным системам плотин с геофизическими методами. Так, предвестники землетрясений 31.1.1999 и 21.02.1999 в Дагестане

обнаруживались почти синхронно аномалиями в фильтрационных расходах Чиркейской плотины и измерением кажущегося электрического сопротивления горных пород методом дипольного электрического зондирования Дагестанской ОМСП (Мусаев, Идармачев) на правом берегу, на расстоянии 700 м от плотины (рис. 11). В нижнем бьефе Саяно-Шушенской ГЭС 8 геофизических скважин реагируют на изменения поля напряжений синхронно с дренажной системой плотины.

В процессах модернизации КИА в целом отмечается преобладающая тенденция в сторону регистрации динамических процессов, непрерывного мониторинга, создания информационно-диагностических систем.

В 2011 г. на Красноярской ГЭС введена в опытную эксплуатацию автоматизированная система регистрации землетрясений и мониторинга технического состояния плотины на базе трехкомпонентных пьезоэлектрических датчиков, разработанная КТИ ВТ СО РАН и Югорским НИИ информационных технологий. Пункты наблюдений в количестве 10 шт. установлены в типовых расчетных секциях плотины на верхних и нижних отметках с опорными точками в берегах. Система обеспечивает сбор и регистрацию сейсмических сигналов, обработку данных с выделением сейсмических событий (Кузьменко, Майнагашев, 2011).

ГЛАВА 3 ОТКЛИК ПЛОТИН НА СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

3.1. Общие положения

Для доказательства существования отклика действующих измерительных систем высоких плотин на геодинамические нагрузки были проанализированы материалы натуральных наблюдений на 11 отечественных плотинах в сейсмоактивных регионах за весь период эксплуатации с момента заполнения водохранилища.

Следует заметить, что действующими в гидротехническом строительстве нормативными документами не предусматривался учет геодинамических воздействий (кроме сейсмического с расчетной интенсивностью для данного района по картам ОСР-78 и ОСР-97). Скальное основание, вмещающее геоблок, понималось, чаще всего, как пассивная, сплошная изотропная среда, иногда с коэффициентами податливости по Фогту, подчиняющаяся законам геомеханики и теории упругости. С появлением решений методом конечных элементов (МКЭ) в трехмерной постановке учитывается наличие в основании крупных зон тектонических нарушений и трещин, деформативные свойства пород за пределами упругости и литостатические напряжения. Возможность современных тектонических движений по разломам и тектоническим трещинам не рассматривается. Понятно, что на стадии проектирования учесть это обстоятельство невозможно, но при составлении уточненной математической модели действующего сооружения, с учетом материалов натуральных наблюдений, это возможно и необходимо, в частности, при проведении поверочных расчетов. Долговременные изменения свойств водонасыщенных пород основания, возможная активизация разломов, возникновение крипа, снижение запасов устойчивости потенциально неустойчивых массивов должны учитываться также при составлении декларации безопасности.

До сих пор считается, что традиционные для плотин измерительные системы, контролирующие их статическую работу, непригодны для измерения деформаций и смещений от динамических воздействий при быстрых движениях земной коры. А задача выделения напряжений в результате медленных движений земной коры, крипа, давления потенциально неустойчивых массивов не ставилась. Непонятные флуктуации графиков измеряемых параметров обычно считаются случайными ошибками и при обработке результатов наблюдений не учитываются.

Гидротехническая наука, обосновавшая возможность создания геомасштабных природно-технических комплексов, стимулировала быстрое развитие геомеханики, неотектоники, сейсмологии, экологии, теории дискретной геофизической среды. Вместе с тем она оказалась консервативной в восприятии обратных связей, например в осмыслении влияния крупных водохранилищ на региональную сейсмичность, неотектонику, изменения прочности и деформативности скальных пород во времени, активизацию унаследованных движений, а следовательно, влияния вмещающего геоблока на динамику и статику самих плотин.

С учетом этих обстоятельств, ретроспективный анализ материалов натуральных наблюдений проведен по региональным каталогам землетрясений с целью поиска реакции сооружений на сейсмические события, а возможно, и на их подготовительный период. Проанализированы показания КИА различного типа, установленных в 11 высоких плотинах РФ и СНГ. С этой целью из обширных материалов натуральных наблюдений выбирались наиболее подробные графики с ежесуточной или близкой к ней частотой отсчетов, определялись наиболее надежные и информативные по типу и месту установки датчики. Учитывались геоструктурные, геоморфологические, сеймотектонические особенности оснований, конструктивные особенности сооружений, результаты тектонических и сейсмологических исследований региона, все наиболее сильные перенесенные сейсмические события.

Реакции на геодинамические воздействия определялись как аномальные изменения тренда графиков или их флуктуации на фоне известных зависимостей измеряемых параметров от изменений УВБ, температуры и техногенных причин. Региональные сейсмические события и их параметры принимались по данным ежегодников «Землетрясения в СССР», «Землетрясения в Северной Евразии» и по ежедекадным сейсмологическим бюллетеням ЦОМЭ РАН ИФЗ (ОИФЗ) г. Обнинск. Для анализа отбирались события с эпицентральным расстоянием преимущественно 100–150 км, а при сильных ($K \geq 13$) землетрясениях – до 500 и более км. Достоверность выделенных сигналов на графиках отдельных средств измерения проверялась по датчикам другого типа, по показаниям измерительных систем ближайших плотин и по публикациям о конкретных сильных землетрясениях. Ниже приводятся результаты ретроспективных исследований по некоторым объектам.

3.2. Каскад Нарынских ГЭС и Кировская плотина

Указанные ГЭС на р. Нарын в Кыргызстане расположены в пределах Южного и Центрального Тянь-Шаня. Район включает на севере хребты Таласский, Сусамырский, Атойнокский и Сусамырскую впадину, на юге – хребет Каспирим-Тау, на западе – Ферганский, в центральной части – Кетмень-Тюбинскую впадину, вмещающую водохранилище Токтогульской ГЭС. Территория характеризуется широко развитой сетью разрывных нарушений, высокой сейсмической активностью, хорошо изучена в геологическом и сейсмологическом отношениях [Каган, Чечот, 1980; Крестников, Нерсесов, 1980].

К тектоническим нарушениям первого порядка в рассматриваемом районе (рис. 3) относятся Таласо-Ферганская, Ичкеле-Сусамырская, Терскей-Таласская и Нарыно-Чичканская зоны глубинных разломов. Наиболее активным является Таласо-Ферганский разлом длиной 400 км и шириной 6–10 км, разделивший Тянь-Шань на две различные тектонические области. Макси-

мальные амплитуды смещений наблюдаются в южной части, где и расположен каскад Нарынских ГЭС. Створы Токтогульской, Курпсайской и Ташкумырской плотин размещены вдоль Нарыно-Чичканской зоны длиной около 200 км и шириной 2–3 км, почти совпадающей с руслом р. Нарын. Это единственное разрывное нарушение, пересекающее Таласо-Ферганский разлом. А в зоне этого пересечения, в Кетмень-Тюбинской впадине, образовано водохранилище Токтогульской ГЭС, которое является регулирующим для всего каскада Нарынских ГЭС, состоящего из 5 электростанций.

Токтогульская ГЭС с бетонной гравитационной плотиной высотой 215 м, длиной по гребню 300 м и объемом бетона 3345 тыс. м³ образует водохранилище с проектным объемом 19,5 км³ с высотой призмы сработки 63 м. Второй по размерам на р. Нарын является Курпсайская плотина высотой 113 м, длиной по гребню 364 м, объемом бетона 1100 тыс. м³ и водохранилищем суточного регулирования. Поскольку безопасность Ферганской долины и всего Нарынского каскада ГЭС зависит от надежности Токтогульской плотины, а главной угрозой для нее являются сильные землетрясения, основное внимание должно быть уделено контролю за состоянием именно этой плотины и изучению ее взаимодействия с вмещающей геологической средой.

Плотина и водохранилище Токтогульской ГЭС располагаются в пределах северной и южной структурно-фациальных зон Тянь-Шаня. Кетмень-Тюбинская впадина, вмещающая водохранилище, ограничена с запада и севера отрогами Таласского Алатау, с севера и востока – хребтом Сусамыртау, и с юга – отрогами Ферганского и Баубашатинского хребтов. С юго-запада тектонической границей впадины является Таласо-Ферганский разлом. После пересечения Таласо-Ферганского разлома русло Нарына проходит в узком, глубоком каньоне, местами совпадающем с трассой Нарыно-Чичканского разлома. Высота бортов каньона достигает 1500–1900 м, основание плотины сложено метаморфизированными известняками с объемной массой 2650–2700 кг/м³ и прочностью на сжатие 80–100 МПа.

Со стороны нижнего бьефа вмещающий геоблок ограничен Тигирекским взбросом с амплитудой смещения до 400 м. Считается, что Токтогульская плотина расположена в едином структурно-тектоническом блоке в высокопрочных кристаллических известняках, нарушенных разрывами и трещинами различного генезиса с преобладанием трещин разгрузки. Наиболее крупные блоки между тектоническими разрывами IV порядка имеют размер 160–200 м, зоны влияния разрывов – до 20 м, заполнитель – глина трения, милонит и брекчия. Значительная часть тектонических трещин заполнителя не имеет. Исследования собственных напряжений в массиве бортов долины показали значения от 6 до 17 МПа сверху вниз. Модуль деформации $(4,5–15) \cdot 10^3$ МПа, в пределах зон влияния тектонических трещин $(1–6) \cdot 10^3$ МПа. Район находится в состоянии близгоризонтального сжатия почти по нормали к руслу р. Нарын [Крестников, Нерсесов, 1980].

Створ Токтогульской ГЭС и створы других гидроэлектростанций Нарынского каскада представляют собой беспрецедентный пример приближения к сейсмогенерирующим разломам первого порядка. Расчетная интенсивность сейсмической нагрузки – 10 баллов при ускорениях 0,3 и 0,45 g. Коэффициент запаса устойчивости при особом сочетании нагрузок определен в размере более 1,3. Показатели сопротивления сдвигу: коэффициент трения $f = 0,6–0,8$, сцепление $C = 0,2–0,4$ МПа.

Характерно, что оценки повторяемости катастрофических землетрясений в регионе по мере его сейсмологической изученности изменялись почти на порядок. Если в 1980 г. она оценивалась для землетрясения интенсивностью 9 баллов один раз в 3 000–15 000 лет, то в 1990 г. эта оценка изменилась до 400–500 лет. Фактический же интервал времени между 9-балльным Чаткальским землетрясением 2 ноября 1948 г. и Сусамырским 18 августа 1992 г. такой же интенсивности составил всего 46 лет. Кроме того, наблюдениями ИФЗ в период 1957–1986 гг. установлено наличие возбужденной сейсмичности из-за изменений уровня Токтогульского водохранилища.

За период первого наполнения водохранилища в 1973–1977 гг. сейсмический режим не отличался от среднемноголетнего с частотой в среднем 8 ощутимых землетрясений в месяц. В 1978 и 1979 г., когда напор на плотину достиг 130 м, количество таких толчков возросло до 18 в месяц, а в конце 1979 г., когда УВБ повысился на 25 м, сейсмическая активность возросла до 80 событий в месяц. При этом большинство эпицентров группировалось в радиусе 5 км от гидроузла, а очаги были приурочены к Карасуйскому разлому на глубине 4–5 км под площадкой строительства.

По данным В. Н. Крестникова и И. Л. Нерсесова береговые примыкания плотин в пределах Нарыно-Чичканского разлома относятся к разным зонам по сейсмической активности: левый берег – к Карасуйской, более активной, и правый – к Нарыно-Чичканской, более спокойной. Это создает условия для дифференцированной работы береговых примыканий, нежелательных для монолитности и водонепроницаемости плотины.

Сетью региональных сейсмостанций здесь зарегистрировано следующее количество сильных землетрясений $K \geq 12$ (табл. 6).

Таблица 6

**Количество землетрясений $K \geq 12$ в районе Токтогульской ГЭС
за период 1929–1986 гг.**

Энергетический класс (K)	Периоды		Всего за период 1929–1986 гг.
	1929–1956 гг.	1957–1986 гг.	
12	39	20	59
13	8	8	16
14	2	1	3
15	–	–	–
17	1	–	1

Анализ результатов геодезических наблюдений Ташкентского отделения Гидропроекта за период с начала наполнения Токтогульского водохранилища в конце 1973 г. до 1993 г. показал, что практически все перенесенные плотиной сильные землетрясения

с магнитудами 5–7 эпицентрными расстояниями до 260–290 км вызвали отклик в графиках осадок и смещений плотины (рис. 12). Так, Исфара-Баткенское 30, 31 января 1977 г. и Дараут-Курганское 1 января 1978 г. землетрясения с магнитудами $M = 6,3$ на расстояниях до 200–300 км от Токтогульской ГЭС вызвали подъем в графике осадок основания и реперов в нижнем бьефе на 1,5–2 мм. Одновременно скальные деформометры под подошвой плотины и в левобережном береговом примыкании показали деформацию сжатия на 0,3 мм на базе 2000 мм (рис. 13).

Перед Исфара-Баткенским землетрясением anomalно изменялся уровень группы пьезометров в основании под напорной

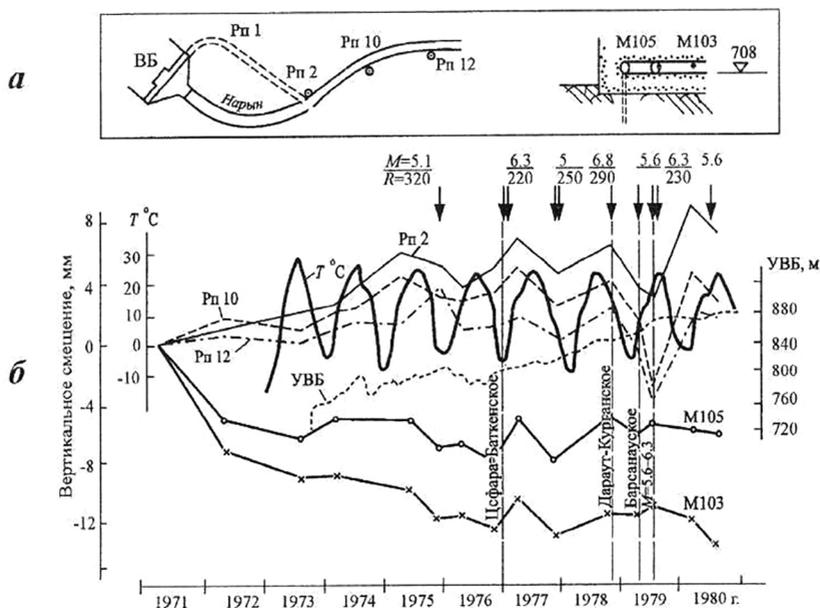


Рис. 12. Вертикальные смещения реперов в нижнем бьефе и осадочных марок в дренажной галерее Токтогульской плотины с учетом воздействия землетрясений:

a – схема размещения реперов и марок, *б* – графики УВБ, температуры воздуха, смещений реперов и марок. Стрелками показаны сейсмособытия (табл. 7 в тексте)

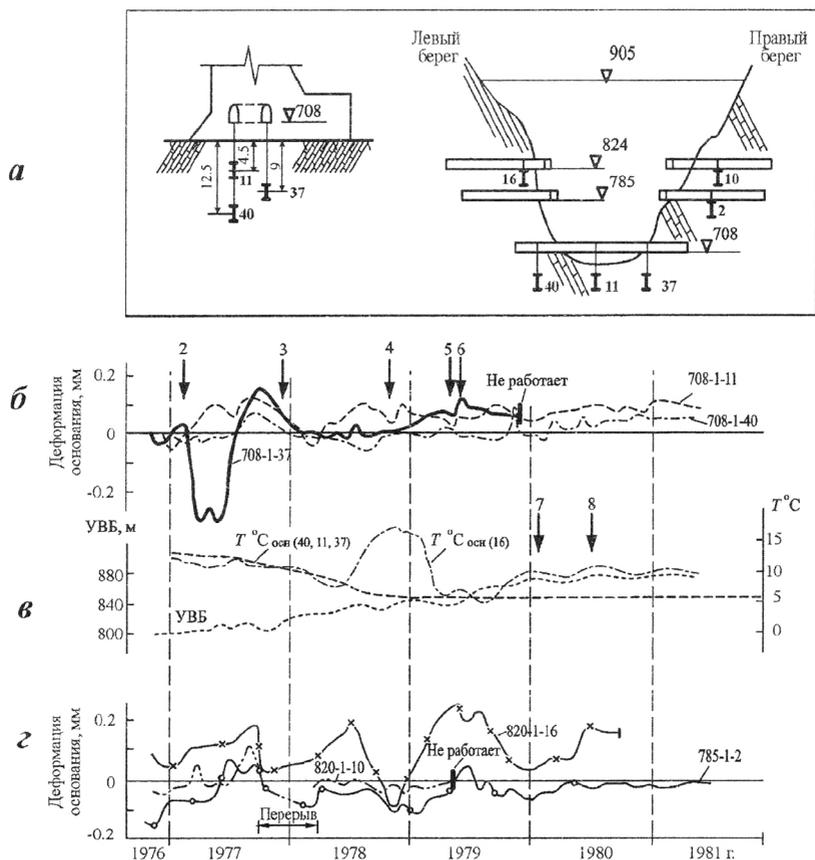


Рис. 13. Влияние землетрясений на вертикальные деформации основания Токтогульской плотины, измеренные скальными деформометрами типа ДЛДС-2000:
а – схема размещения приборов, **б** – деформации основания в русловой части плотины на отм. 708 м, **в** – уровень водохранилища и температура скалы, **г** – деформации в береговых упорах на отм. 820 м. Стрелками показаны сейсмособытия $M \geq 5$ (см. табл. 7)

гранью плотины с колебаниями до 20 м в правобережном при-
мыкании при постоянном уровне водохранилища. Аналогичные
подъемы осадок наблюдались в период Дараут-Курганского зем-
летрясения, которое отмечено флуктуациями в графиках пока-
заний отвесов с амплитудой до 2 мм.

Обращает на себя внимание существенная разница в разме-
рах и характере реакции поверхностных реперов и осадочных
марок в галереях плотины от землетрясений 1979 г. (рис. 13),
которая отмечена ростом возбужденной сейсмичности при на-
полнении водохранилища. Величина вертикальных смещений
максимальна на поверхности и быстро убывает с глубиной, по-
давленная весом плотины и сжимающими напряжениями от
распора в берега. Такую же закономерность можно наблюдать
на графиках показаний скальных деформометров, расположен-
ных на отметках по высоте береговых примыканий плотины.
В том же 1979 г. деформометр на отм. 820 м при землетрясениях
22.05.1979, 15 и 19.11.1979 (табл. 7) показал величину смещения
в 2–3 раза больше, чем на отм. 708 м. К сожалению, время отсче-
тов по приборам не совпадает со временем сейсмических собы-
тий, поэтому количественное сравнение носит относительный
характер.

Створ **Курпсайской ГЭС** расположен в 40 км ниже по течению
от Токтогульской ГЭС и в 65 км от Таласо-Ферганского разло-
ма, в пределах двух структурно-фациальных зон, разделенных
Кызкурганским разломом. Модуль деформации пород в верх-
ней зоне $(2-2,5) \cdot 10^3$ МПа, глубинной – до $7 \cdot 10^5$ МПа. Характе-
ристики сопротивляемости сдвигу: коэффициент трения $f = 0,9$,
сцепление $C = 0,3$ МПа. Плотина размещена в пределах одного
структурно-тектонического блока, ограниченного с севера раз-
ломом № 6, а с юга – Курпсайским разломом. Блок сложен по-
родами моноклинального залегания с падением вверх по реке
под углом $40-70^\circ$ и представляет собой флишевую толщу из
слоев песчаника и аргиллитов с редкими прослойками осадоч-
ных брекчий. Содержание аргиллитов увеличивается книзу до
25–30 %. Разлом № 6 проходит выше по реке на расстоянии 500 м

Каталог представительных землетрясений к рис. 12 и 13

№, п/п	Дата, год	Энергетический класс, К	Магнитуда, М	Глубина очага, h , км	Эпицентральное расстояние R , км	Примечания
1	29.12.1975	12	5,1	160	320	
2	30, 31.01.1977	13–15	6,3	25–130	220	Исфара-Баткенское
3	26.12.1977	11 4 толчка К = 9	–	10–15, 100	80–250	
4	01.09.1978	16	6,8	20–30	280	Дараут-Курганское
5	06.04.1979	–	5,1	15		Барсанауское
6	22.05.1979	12+ 2 толчка К = 10 2 толчка К = 9	–	15–220	225	Кочкорка 5 баллов Нарын 3–4 балла
7	13.01.1980	13	5	10	225	Ош 3 балла
8	05.07.1980	14	5,6	27	360	

от плотины, имеет субперпендикулярное к реке простирание и вертикальное падение. Курпсайский разлом также ориентирован поперек реки, которую пересекает в 3-х км ниже плотины. По проекту район отнесен к 9-балльной зоне сейсмичности, по карте ОСР-97 – 10 баллов. Коэффициент запаса устойчивости на сдвиг при особом сочетании нагрузок 1,18. Расчет прочности плотины при основном сочетании нагрузок проведен из условия отсутствия растягивающих напряжений в плотине и на контакте с основанием.

Плотина Курпсайской ГЭС классического гравитационного типа образует водохранилище $0,37 \text{ км}^3$ для выравнивания расходов Токтогульской ГЭС. Данные измерительных систем Курпсайской плотины представляют ценный материал для анализа геодинамического влияния, т. к. водохранилище было наполнено быстро, а сезонные колебания УВБ незначительны.

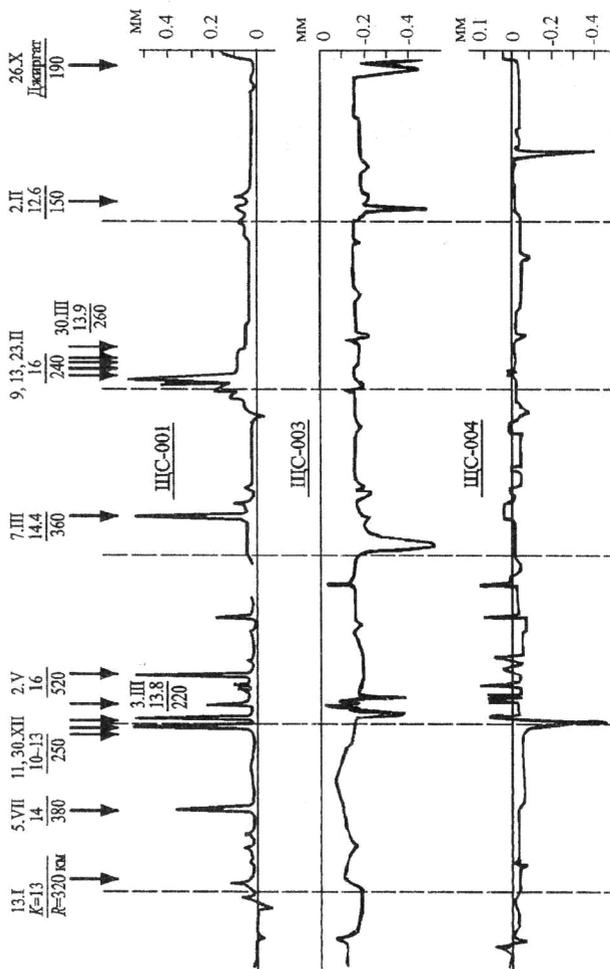
Для анализа из регионального каталога выбраны наиболее представительные сейсмические события энергетического класса $K = 12-16$ с расстоянием до 360 км. Основное внимание уделено контактными приборам, по которым в 1981 г. снимались ежесуточные отсчеты. Из графиков на рисунке 14 следует, во-первых, возможность получения четких сигналов статической аппаратуры от динамических воздействий. Об этом свидетельствуют остропиковый характер графика ежесуточных отсчетов и отмеченные случаи выхода датчиков из строя во время толчков при исчерпании диапазона измерений. Во-вторых, по показаниям контактных шелемеров в основании видно, каким испытаниям на растяжение подвергается контакт скала–бетон во время сейсмических событий. Трудно представить, что при этом сцепление «С» из двучленной формулы устойчивости на сдвиг Кулона–Мора сохраняется. Весьма характерна разница в реакциях шелемеров в зависимости от распределения напряжений по основанию плотины. Датчик 003, расположенный в зоне большего сжатия в средней части основания значительно слабее реагирует на импульсные нагрузки, чем шелемеры 001 и 004, установленные под напорной гранью, где напряжения сжатия в основании

близки к нулю. В-третьих, из графика на рисунке 14 становится очевидной важность частого опроса приборов для получения качественной информации о последствиях динамических нагрузок: на графиках 1982–1984 гг. с периодичностью отсчетов раз в три дня многие пики срезаны в отличие от картины 1981 г., полученной по ежесуточным отсчетам.

Не меньшему геодинамическому влиянию подвергаются и контакты плотины с береговыми примыканиями. Установленные здесь шелемеры и деформометры имеют характерные флуктуации, не зависящие от изменений УВБ и температуры. Контакт скала–бетон в примыканиях напорной грани к берегам на отм. 676 и 692 м по показаниям приборов был нарушен с открытием трещин от 2 до 10 мм, что неизбежно вызывает перераспределение напряжений в теле плотины с возникновением вторичной системы. Одна из основных расчетных нагрузок – силовое воздействие фильтрующейся воды – существенно изменяется при наличии геодинамического влияния. Так, снижение пьезометрических напоров в 1982 г. в основании Курпсайской плотины при постоянном УВБ может означать временное тектоническое сжатие пород перед увеличением сейсмической активности в Средней Азии в 1983 г., когда после землетрясения 13 февраля 1983 г. с магнитудой $M = 6,6$ произошло 48 афтершоков энергетического класса $K \geq 12$, а 16 и 30 декабря 1983 г. – Гиндукушское землетрясение ($M = 7,1$) с форшоком $M = 6,1$ на расстоянии 260 км к югу от плотины. Анализ изменения фильтрационных расходов по берегам и в русле показал независимость их от УВБ и явный отклик на подготовительный период землетрясений, фильтрационную неоднородность берегов (рис. 15). Коэффициент фильтрации пород в 1988 г. уменьшился на левом берегу в 2 раза, на правом – на 15 %. Это можно объяснить четырьмя землетрясениями энергетического класса $K = 12,3–13,5$ в течение 13 месяцев, которые повлияли на увеличение кольматации трещин и уплотнили массивы береговых примыканий.

Ретроспективный анализ материалов натуральных наблюдений на Курпсайской ГЭС впервые показал нестабильность при

a



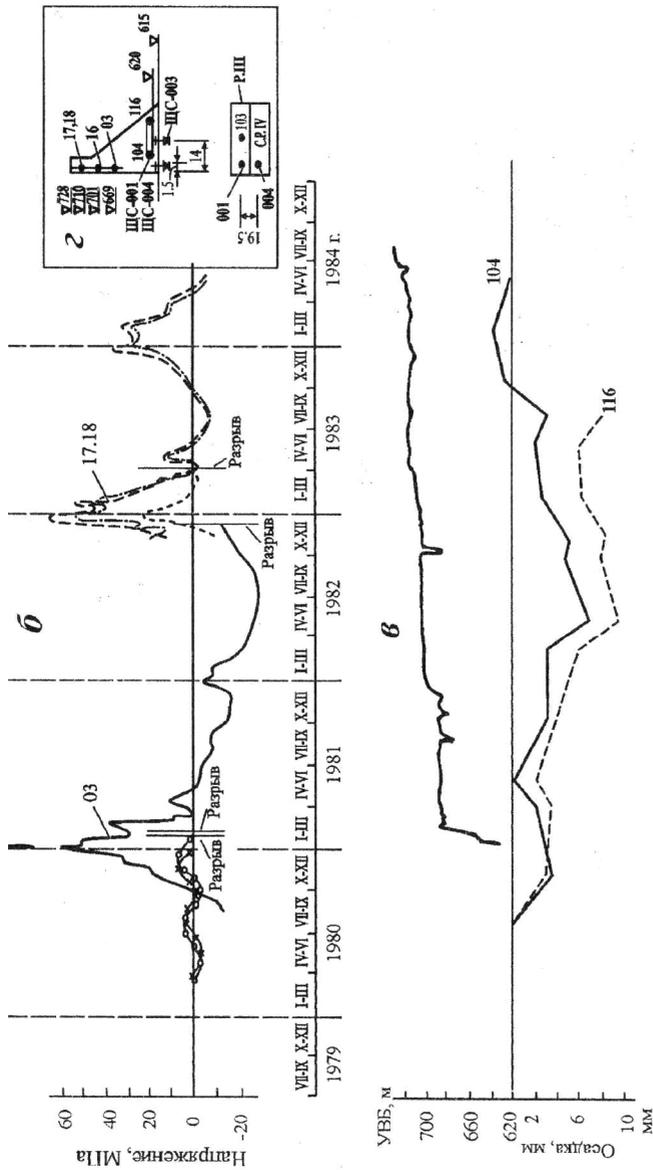


Рис. 14. Реакция датчиков измерительных систем плотины Курпайской ГЭС на внешние нагрузки и землетрясения: а — струнные щелемеры на контакте скала—бетон, б — арматурные динамометры у напорной грани, в — геодезические закладные марки для измерения осадки сооружения, г — схема установки приборов

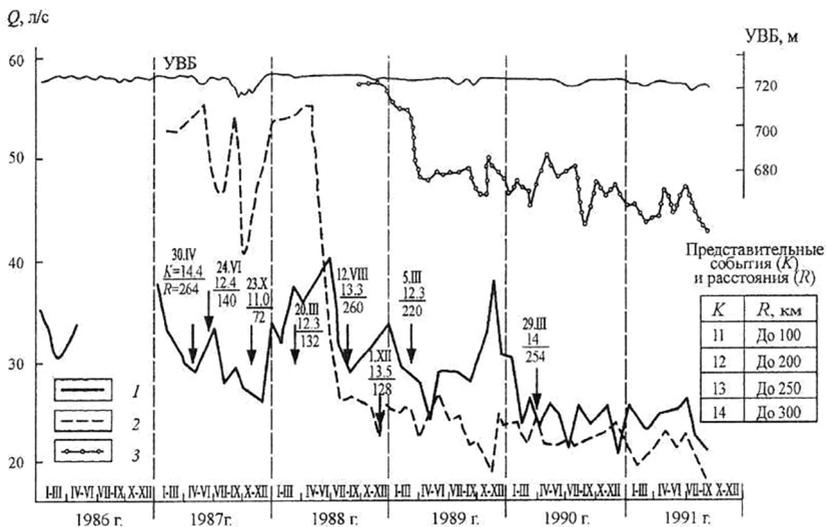


Рис. 15. Отклик фильтрационных расходов в основании плотины Курпсайской ГЭС на сейсмические события 1986–1991 гг.:
1 – русловая часть, 2 – левый берег, 3 – правый берег

постоянном напоре некоторых важных расчетных параметров – величины взвешивающего противодавления, характеристик сопротивляемости сдвигу, коэффициентов фильтрации пород основания, напряжений в арматуре под влиянием геодинамических воздействий.

Массивно-контрфорсная плотина **Кировского** ирригационного водохранилища высотой 84 м и длиной по гребню 260 м возведена в северном Кыргызстане на р. Талас и с 1973 г. испытывает все сейсмособытия, генерируемые в районе Таласо-Ферганского разлома в Терской-Таласской и Ичкеле-Сусамырской сейсмических зонах. Из-за малого количества измерительных систем, редких отсчетов и глубокой сезонной сработки водохранилища для поливов, когда определяющим влиянием является изменение УВБ, выделить четко влияние сейсмических нагрузок сложно. Представляют интерес только подробные графики показаний арматурных динамометров, совмещенные с датами сейсмических собы-

тий. Можно отметить не только высокую чувствительность этих приборов к динамическим воздействиям, что было показано и на рисунке 14 для Курпсайской ГЭС, но и их способность определенное время удерживать сейсмический сигнал, фиксируя вектор действующей силы. Строгая и хорошо известная ориентация этих датчиков вдоль арматурных стержней определяет их различную чувствительность к сейсмическим волнам. Струнный арматурный динамометр ПСАС реагирует только на продольную волну (вдоль струны), ориентированную вдоль стержня на очаг, а ортогональный прибор – на поперечную. Это свойство представляется весьма полезным при определении направления на эпицентр. Однако при выделении сейсмического сигнала из показаний арматурных динамометров следует обязательно учитывать их высокую чувствительность к изменениям температуры.

3.3. Саяно-Шушенская ГЭС (СШ ГЭС)

В начальный период проектирования этого уникального сооружения сейсмологическая и тектоническая изученность региона была недостаточной, что объясняет заниженные требования проекта к сейсмостойкости плотины. Инструментальные сейсмологические наблюдения в районе проектируемой СШ ГЭС на р. Енисей были начаты ИФЗ АН СССР в 1962–1963 гг. Тем не менее выбор типа плотины – арочно-гравитационной – следует признать удачным с точки зрения ее сопротивляемости сильным тектоническим движениям.

Плотина высотой 245 м, длиной по гребню 1066 м, с объемом бетона около 9 млн м³ образует водохранилище емкостью 31 км³ (полезная емкость 15 км³ с высотой призмы сработки 40 м) и обеспечивает выработку электроэнергии более 20 млрд кВтч в год. На участке створа р. Енисей протекает в меридиональном направлении, рассекая почти вкрест горные цепи центральной части Западного Саяна. Джебашский антиклинорий, в пределах которого размещен гидроузел, сложен крепкими метаморфическими сланцами и гранитной интрузией в ядре. К сожалению,

границы интрузии и контактового метаморфизма в основании плотины бурением при изысканиях определены не были. В основании плотины пласты орто- и парасланцев залегают моноклинально с наклоном в сторону правого берега и верхнего бьефа под углом $70-85^\circ$ (рис. 16). Тектонический блок, вмещающий створ плотины, ограничен субширотными зонами Борусского и Кандатского разломов первого порядка. Ближайшими к плотине сейсмогенераторами являются Северо-Борусский разлом ($M = 6$) на расстоянии 6 км, Большепорожский разлом ($M = 6,5$) на расстоянии 60 км к юго-востоку от плотины и Саяно-Тувинский разлом ($M = 7,5$) на расстоянии 130 км.

В контуре основания, на участке основных сооружений имеются четыре относительно крупных тектонических нарушения шириной до 10 м и мощностью смесителей $0,5-2,0$ м, заполнен-

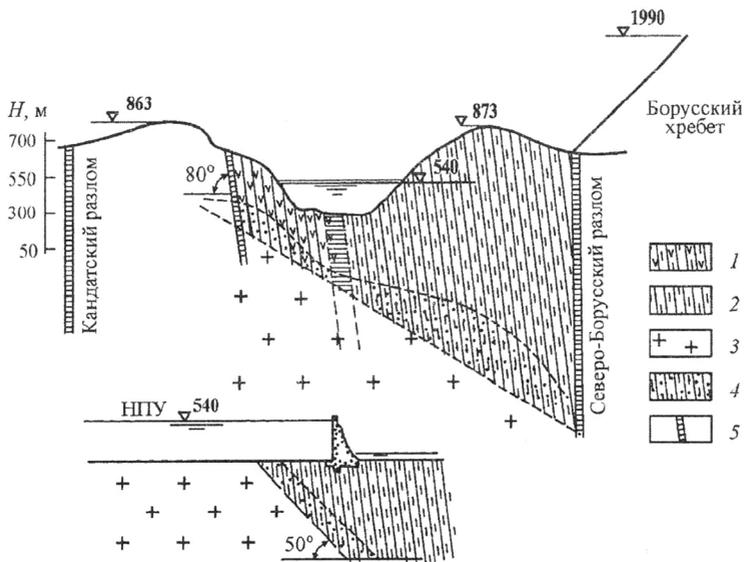


Рис. 16. Геоструктурная схема района створа Саяно-Шушенской ГЭС:

- 1 – ортосланцы зеленокаменные, 2 – парасланцы,
- 3 – джойская гранитная интрузия,
- 4 – зона контактного метаморфизма, 5 – разломы

ных милонитом и тектоническими брекчиями (рис. 17), которые проходят субпараллельно створу, пересекают береговые примыкания и влияют на общие смещения и НДС плотины.

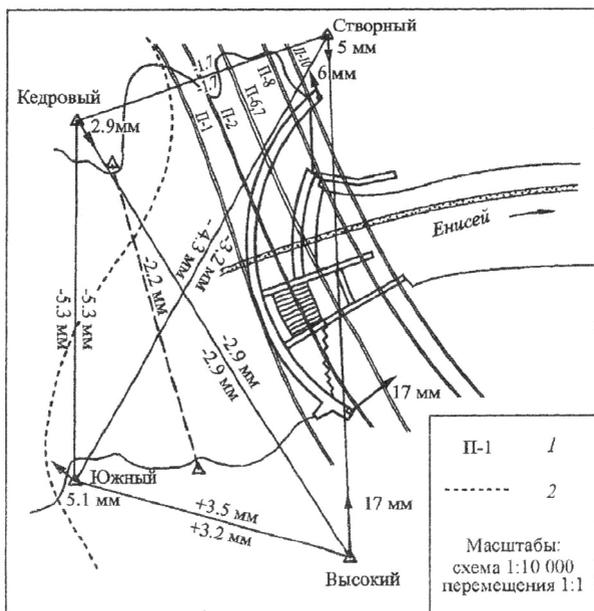


Рис. 17. Векторы горизонтальных смещений геодезических знаков локальной сети триангуляции в районе створа СШ ГЭС за период 1971–1994 г. по данным каркасной съемки эксп. № 7 Ленгидропроекта:
1 – П-1, ..., П-10 – тектонические нарушения, 2 – граница интрузии

Северо-Борусская зона разломов имеет восток-северо-восточное простирание, прослеживается вдоль северного склона Борусского горного массива с господствующей вершиной Борус высотой около 2000 м на правом берегу водохранилища, на расстоянии порядка 6 км от правобережного примыкания плотины. Вмещающие горные породы отличаются высокой степенью всестороннего сжатия, в несколько раз превышающего вес вышележащих пород.

Инженерно-геологические характеристики пород основания гидротехнических сооружений Саяно-Шушенской ГЭС представлены в табл. 8.

Таблица 8

**Инженерно-геологические характеристики пород основания
Саяно-Шушенской ГЭС**

Показатели	Единица измерения	Порода	
		Парасланцы (правый берег)	Ортосланцы (левый берег)
Удельный вес	Т/м ³	2,87	3,01
Объемный вес	—	2,83	2,97
Пористость	%	1,60	1,30
Водопоглощение	—	0,10	1,30
Предел прочности на одноосное сжатие			
В сухом состоянии	Кг/см ²	1400	1400
В водонасыщенном	—	1250	1250
Коэффициент размягчения	—	0,90	0,90
Модуль деформации относительно сохранных пород			
Динамический	Т/см ³	347–508	277–468
Статический	Т/см ³	151–365	136–236
Коэффициент Пуассона	—	0,22–0,35	0,24–0,28
Параметры сопротивления сдвигу			
Расчетный коэффициент трения, <i>f</i>	—	1,0	1,0
Сцепление, <i>C</i>	МПа	0,5	0,5

По данным Института земной коры (ИЗК) СО РАН карта локальных полей тектонических напряжений имеет векторы сжатия в основном нормально к руслу, векторы растяжения — вдоль русла р. Енисей, по направлению действия гидростатической нагрузки.

В середине русла, по границе орто- и парасланцев прослежено разрывное нарушение с высокой водопроницаемостью (основание секций 28–33 плотины).

В связи с проектированием СШ ГЭС в период 1963–1965 гг. изучалась и неотектоника Западного Саяна. Отмечено ослабление активизации тектонических движений на заключительных стадиях орогенеза и относительно невысокий уровень сейсмической активности [Масарский, Рейснер, 1971]. Зятькова Л. К. [Зятькова, 1973, 1977] отнесла Джебашско-Джойский тектонический блок, вмещающий гидроузел, к блокам «менее интенсивных поднятий» со спокойным проявлением новейших тектонических движений.

Указанные авторы не прогнозировали возможного влияния крупного глубоководного водохранилища на сеймотектонические условия региона. Палеосейсмологические условия и неотектоника района были изучены недостаточно, тогда как между Кантегирским и Борусским разломами выделена неотектоническая структура Джой. По описаниям П. Я. Зеленкова со ссылками на данные изыскателей Ленгидропроекта [Прочухан, Пирогов, Бадухин, 1972] расщелина шириной 10–15 м, отчленяющая монолитный гранитный блок от коренного склона ничего общего не имеет с обычными трещинами бортового отпора, разгрузки, оседания и т. п., что предполагает ее сейсмогенное происхождение. Шурф, пройденный в ее плоскости на глубину 9 м, не достиг коренных пород [Пирогов, 1987].

На правом берегу Енисея, на продолжении зоны расщелины в коренном русле Енисея геофизическими методами обнаружены два переуглубления на 36 и 96 м. Заложенные в берегу разведочные скважины до глубины 70 м не достигли коренного основания. На продолжении этих депрессий на обоих берегах Енисея видны циркообразные стенки обрыва с явным дефицитом обвальная массы. Связь этих депрессий с береговыми цирками не вызывает сомнений. Предполагается, что эти аномалии вызваны интенсивным погружением двух блоков земной коры в результате сильного землетрясения с магнитудой $M = 6,5$. Было

рекомендовано провести дополнительные обследования Джойской структуры, которые остались нереализованными.

С целью выявления современных тектонических движений Ленгидропроектом в районе створа с 1965 по 1975 г. выполнено 5 циклов нивелировки 1 класса по маркам на бортах Кантегирского, Карлова и других ближайших разломов. По итогам этих нивелировок сделано заключение, что «заметных проявлений тектонических движений нет». Это заключение было небесспорным, т. к. по данным измерений фиксировались градиенты смещений до 10^{-5} см/см в год, тогда как значения градиентов 10^{-8} уже считаются критерием тектонической активности [Моги, 1988].

С началом наполнения водохранилища в 1978 г. были получены новые данные по результатам нивелировок реперов в пределах воронки оседания — на расстояниях 2 км вверх и 3 км вниз от плотины. Во-первых, проявилась дифференцированная работа берегов с монотонным увеличением осадок правого берега водохранилища и признаками надвига на левом берегу (рис. 18), что может быть признаком проявления унаследованного движения интрузии, прорвавшейся на левом берегу. Во-вторых, с первых циклов наблюдений отмечены нарушения корреляции между нагрузкой от веса воды в водохранилище и осадками. В-третьих, обнаружилась значительная разница в осадках соседних реперов воронки оседания с изменением знака, с размахом в одном цикле до 13 мм. В нижнем бьефе влияние воронки оседания распространилось более чем на 3 км с высокой степенью корреляции с УВБ. Однако и здесь заметно влияние разломов, пересекающих русло Енисея (Карлов, Солонечный, Карымов), особенно на правом берегу.

Плановые смещения в районе створа выявлены только в 1994 г. каркасной съемкой экспедиции № 7 Ленгидропроекта по знакам локальной системы триангуляции. По сравнению с 1971 г. обнаружено схождение берегов, характерное для многих горных гидроузлов. Однако в данном случае вектор подвижки знака «Высокий» (рис. 17) можно считать и тектоническим движением,

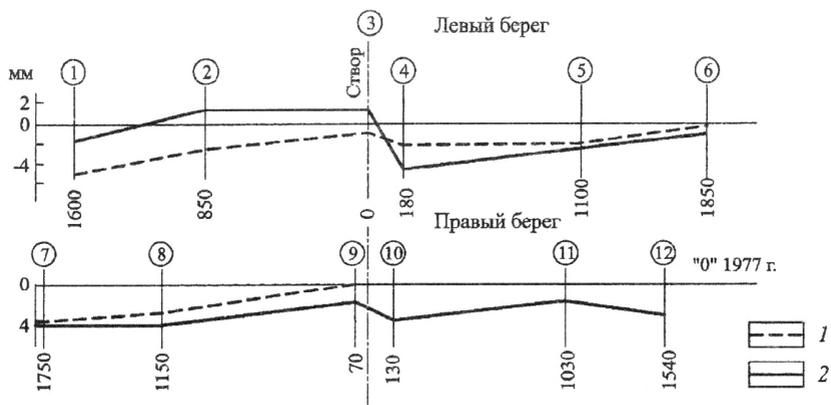


Рис. 18. Результаты нивелировок реперов воронки оседания в первые годы наполнения водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС (экспедиция № 7 Ленгидропроекта):
1 — 1983 г., УВБ 475,3 м, 2 — 1988 г., УВБ 526,6 м

поскольку оно совпадает с направлением главных осей сжатия, прорыва интрузии, носит признаки унаследованности и соответствует геостатической неравномерности берегов. Не случайно рисунках 18 и 17 коррелируются между собой. Проведенные в начале 90-х гг. полевые исследования, проведенные ИЗК и Институтом геофизики СО РАН позволили сделать заключение о том, что «они подтверждают высокую тектоническую активность горной части Западного Саяна и непосредственно на участке расположения СШ ГЭС. Более молодые и активные подвижки наблюдаются по разрывам в непосредственной близости от створа плотины и в зоне влияния Северо-Борусского разлома».

Сейсмогенные деформации плотины и основания фиксируются измерительными системами плотины с 1981 г., когда вступили в действие три первых сейсмоприемника в секциях 18, 33 и 46 на отм. 344 м. Во время сработки и последующего наполнения водохранилища в 1981 г. зарегистрирован ряд слабых землетрясений. Было замечено [Иванов, 1982], что такие землетрясения регистрируются отвесами повторно при одних и тех же значениях УВБ. Для проверки динамического сейсмогенного

характера этих деформаций число циклов наблюдений по отвесам в 1982 и 1983 гг., когда УВБ изменялся на 80–90 м, было увеличено до пяти, а по системе вытянутых треугольников (СВТ) до двух в неделю. В декабре, феврале и марте 1982 г. зафиксированы колебания плотины, совпадающие по времени с землетрясениями. За первое полугодие 1983 г. отмечено 15 сейсмических событий энергетического класса $K = 9–11$. К сожалению, специального сейсмологического анализа результатов этих геодезических измерений проведено не было. А отмеченные первыми тремя сейсмографами в секциях 18, 33 и 45 сейсмические события 1982/1983 гг. ВНИИГ [Отчет о НИР, 1985] признал техногенными. Систематические сейсмометрические наблюдения на плотине не велись до 1992 г. Наиболее интересный период для наблюдения возбужденной сейсмичности при первом наполнении водохранилища был упущен. С 1992 г. руководство ГЭС приступило к энергичному формированию сейсмометрической сети на плотине.

На Саяно-Шушенской ГЭС впервые в отечественной практике натуральных наблюдений отмечались значительные флуктуации практически всех измеряемых параметров, что свидетельствовало о сильных динамических влияниях. Наиболее заметными были пульсации дренажных скважин в штольнях и смещения береговых упоров плотины. В 1984 г. радиальные смещения в сторону нижнего бьефа достигли значений 13 мм на правом и 9 мм на левом [Карлсон, Кондратьев 1986]. По точкам полигонометрии зафиксировано сближение берегов в верхнем бьефе на расстоянии 400 м от плотины на 78 мм, в нижнем бьефе – на 10–13 мм. Геодезическая служба экспедиции № 7 Ленгидропроекта в отчете за 1993 г. отметила, что длина дуги плотины по гребню при проектном напоре за период 1990–1993 гг. сократилась на всех отметках от 28 мм на отм. 344 м до 19 мм на отм. 413 м. Подвижки в береговых примыканиях подтверждаются резким одновременным падением в июле 1990 г. десяти торцевых пьезометров в правобережной штольне на отм. 344, у которых, очевидно, были «срезаны» водоприемники.

Одновременно с регистрацией сейсмогенных нагрузок измерительные системы плотины, усиленные автоматизацией от-весов [Карлсон, Кондратьев, Ткачева, Зюкин 1986, 1998], фиксировали постоянный медленный рост арочного сжатия. Измеренные напряжения в плотине вместо расчетных 9 МПа для основного сочетания нагрузок в 1995 г. достигли уровня 12 МПа. Это объяснялось в основном перераспределением напряжений в плотине из-за возникновения трещин на напорной грани и по контакту со скалой. Однако, по нашему мнению, давление со стороны правого берега было вызвано унаследованным движением интрузии, литостатической неравномерностью берегов, большей высотой и сейсмической активностью правого берега, более глубоким его водонасыщением из-за разломов и полуостровного характера, меньшими параметрами сопротивления сдвигу. Кроме того, геофизическими и фильтрационными исследованиями было установлено существенное разуплотнение пород основания под всей подошвой плотины, снижение модуля деформации основания в первые годы эксплуатации при НПУ по 8 % в год и увеличение фильтрационного расхода до 500 л/с против 190 л/с по расчетам к проекту. При высоких собственных напряжениях сжатия, ориентированных нормально к руслу, такое разуплотнение также способствовало развитию крипа со стороны берегов.

Новые данные о геодинамическом влиянии позволила получить автоматизированная система контроля горизонтальных смещений (САК ГС), впервые установленная на обратных отвесах в основании трех контрольных секций (18, 33, 45) плотины Саяно-Шушенской ГЭС. В октябре-ноябре 1990 г. при первом наполнении водохранилища до проектной отметки 540 м получены записи отклика приконтактной зоны основания на землетрясение 15 ноября 1990 г. с магнитудой $M = 4,4$ (рис. 19). Все смещения были обратимыми, достигали 2–4 мм, причем в основании секции 18 у левого берега отмечено смещение в сторону верхнего бьефа, а в основании секций 33 и 45 – в нижний бьеф. Такой характер смещений сохранялся и в дальнейшем, его можно объяснить

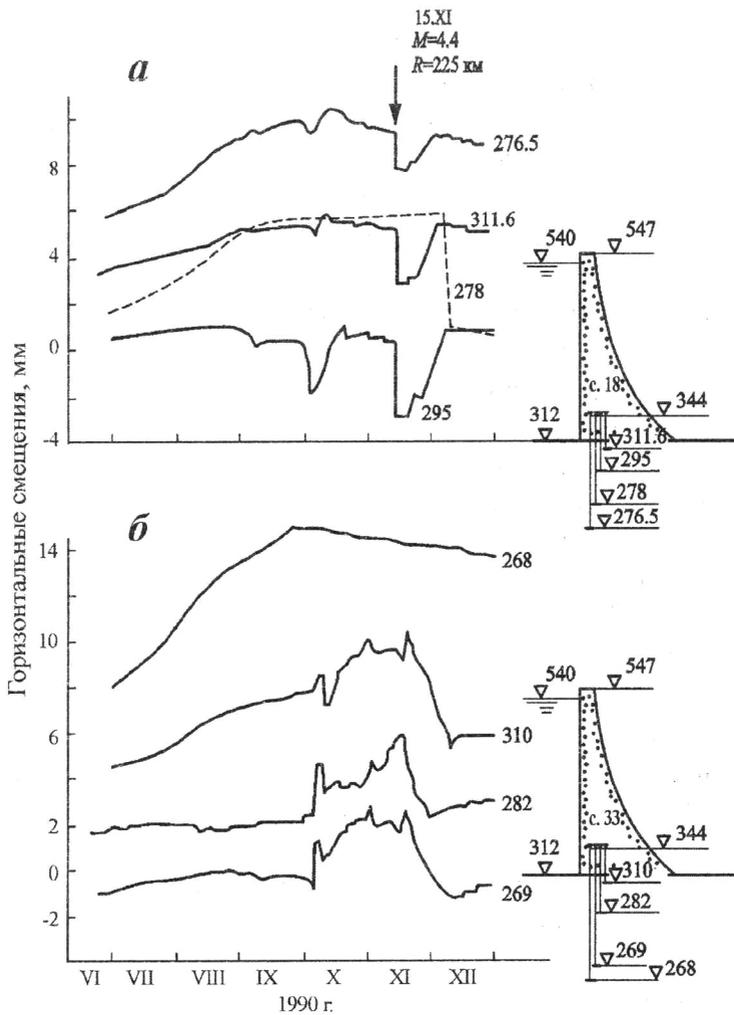


Рис. 19. Пример записи землетрясения с магнитудой $M = 4,4$ системой САК ГС на обратных отвесах секций 18 (а) и ключевой секции 33 (б) плотины Саяно-Шушенской ГЭС

ориентацией тектонических нарушений в основании и особенностями левобережного примыкания плотины, когда смещения направлены в сторону повышенной деформативности пород. Еще одна особенность смещений заключалась в том, что якоря на нижних отметках сместились больше, чем в приконтактной зоне, особенно под секцией 33, ближайшей к русловому разрывному нарушению. Возможно, это результат разгрузки тектонических напряжений, большего разуплотнения пород в глубине или влияние унаследованного движения, так как необратимая составляющая здесь максимальна.

Дискретные горизонтальные смещения в береговых упорах плотины отмечались и вне зависимости от сейсмических событий. Так, в 1993 г. при незначительном понижении УВБ с 500,1 м до 500,06 м конечные точки системы вытянутых треугольников (СВТ) неожиданно переместились в нижний бьеф на 26 мм по левому берегу и на 37 мм по правому. В поперечном направлении эти точки сблизилась на 16 мм слева и на 24 мм справа, т. е. зафиксировано схождение берегов на 40 мм. По утверждению геодезистов (В. И. Кондратьев) ошибки измерений в данном случае исключены. Тем не менее эти измерения руководством ГЭС признаны ошибочными, а система СВТ, к сожалению, в 1993 г. была демонтирована.

С первых лет эксплуатации Саяно-Шушенской ГЭС был отмечен преобладающий наклон секций плотины к левому берегу, который, по нашему мнению, кроме техногенных причин (неравномерность нагрузки по берегам в первые годы наполнения водохранилища) объясняется и геодинамическим влиянием — крипом с правого берега. Кроме того, этот наклон согласуется с характером напластования сланцев. Ретроспективными исследованиями Российской инженерной академии (1993 г.) было установлено, что при изысканиях допущена недооценка современной тектонической активности района створа. Измеренные в штольне правого берега деформации $9 \cdot 10^{-4}$ были оценены как не заслуживающие внимания. На участке Кантегирского разлома нивелировками 1965 и 1967 г. зафиксированы подвижки до

$6,5 \cdot 10^{-6}$. Априори можно было предположить, что с возникновением глубоководного водохранилища тектоническая активность должна возрасти. Так и случилось. За период с 2000 по 2012 г. произошло 6 землетрясений $K = 13,6-15,6$ в том числе Хакасское $K = 13,9$ с эпицентром на расстоянии 70 км от плотины.

Все сейсмособытия перенесены без ущерба для сооружений ГЭС.

3.4. Чиркейская ГЭС

Чиркейская ГЭС на р. Сулак мощностью 1 млн квт – самая крупная гидроэлектростанция Сулакского каскада в Республике Дагестан. Арочная плотина высотой 232,5 м, длиной по гребню 333 м, с объемом бетона 1,36 млн m^3 , высотой призмы сработки 40 м образует водохранилище емкостью 1,3 km^3 [Шандалов, 1973]. Район Чиркейского водохранилища расположен на территории одного из самых сейсмоактивных участков Кавказского региона – сейсмофокальной области (СФО) Дагестанский клин. Здесь были обнаружены крупные палеосейсмодеформации, произошла серия разрушительных землетрясений в 1970–1975 гг. с магнитудами $M = 5,3-6,7$ и интенсивностью сотрясений 7–9 баллов.

После заполнения водохранилища в 1974–1976 гг. отмечен всплеск сейсмической активности, что свидетельствует о появлении возбужденной сейсмичности в регионе. В 1983 г., например, произошло 112 землетрясений с энергетическим классом $K \geq 8$, в том числе 23 с $K \geq 10$. Выделившаяся при этом энергия составила $1,5 \cdot 10^{12}$ Дж [Левкович, 1985].

К сожалению, высокая степень изученности сейсмологических условий региона с учетом влияния водохранилища и большая работа в этом направлении, проведенная Дагестанским филиалом Академии наук СССР, не принималась во внимание в первые годы эксплуатации при анализе взаимодействия плотины с геологической средой. По разным причинам не работала должным образом и сейсмслужба ГЭС.

Квазистационарное состояние плотины было нарушено в 1984 г., когда после роя землетрясений в августе 1983 г. и двух сильных толчков энергетического класса $K = 12$ в 1984 г. появилось аномальное увеличение осадки до 31 мм вместо 26 мм в 1982 г. Первоначально оно было объяснено более длительным, чем обычно, периодом выдерживания высокого уровня водохранилища. При этом неясными оставались причины других аномалий: увеличения и асимметричного перераспределения напряжений в арке, одновременного увеличения прогиба ключевой секции до 62 мм вместо 48 мм в 1982 г. при том же УВБ, скачкообразных изменений пьезометрических уровней и фильтрационных расходов вне зависимости от УВБ, флуктуаций в показаниях отвесов, струнных датчиков и т. п.

Для понимания механизма сейсмотектонического воздействия на Чиркейский гидроузел необходимо четко представлять геоструктурную и тектоническую схему вмещающего массива горных пород. Чиркейская ГЭС и ее водохранилище протяженностью 36 км расположены в предгорьях Кавказа, в области известнякового Дагестана [Новиков, Румянцева, 1984]. Борта долины р. Сулак в 7 км ниже и в 15–20 км выше створа по течению, сложены верхнеюрскими и нижнемеловыми, преимущественно терригенными отложениями — плитчатыми известняками и мергелями общей мощностью около 500 м. На верхнемеловых известняках лежат породы палеогена мощностью до 120 м, представленные пестроцветными мергелями, мергелистыми известняками и глинистыми сланцами.

Тектоника района определяется наличием Хадумской и Салатау-Гимринской антиклинальных складок, ориентированных по генеральному кавказскому северо-западному направлению вкост долины р. Сулак. Эти антиклинальные складки, замыкающие с севера и юга синклиналиный прогиб, образуют мульду Чиркейской котловины, вмещающей водохранилище. Согласно проекту арочная плотина размещена в едином тектоническом блоке (в действительности — в Сулакском разломе), ограниченном с нижнего бьефа сбросом с амплитудой смещения до 30 м на

расстоянии 500 м ниже плотины, а с верхнего бьефа – крупной тектонической трещиной на расстоянии 150 м от плотины. На левом берегу Чиркейского ущелья, составляющего часть юго-восточного крыла Хадумской антиклинали, пласты пород наклонены в сторону русла реки, что создает условия для смещения к водохранилищу и к руслу крупных сколовых массивов по глинистым прослоям соскладчатых трещин (рис. 20). Аналогичная картина наблюдается по всем бортам синклинали мульты, вмещающей водохранилище. В районе гидроузла выделено и наблюдается перемещение по крайней мере пяти оползневых массивов. Существенную роль в этих оползневых движениях играет свойство глинистых прослоев снижать при увлажнении параметры сопротивления сдвигу. По данным исследований Ленгидропроекта и ВНИИГ при расчетных параметрах для трещин $f = 0,7$ и $C = 2$ кг/см² они снижаются до значений $f = 0,25$ и $C = 0,20$ кг/см².

Ближайшими к плотине потенциально неустойчивыми массивами являются массивы II, III на левом берегу и массив I на правом, где активно развиваются процессы трещинообразования. Так, массив III с объемом до 1,5 млн м³ разбит трещинами с раскрытием 1–1,5 м, простирающимися параллельно урезу воды. Отделенные этими трещинами блоки смещаются в водохранилище и разрушаются прибоем. Обратные расчеты по оползням-срывам при землетрясении 14 мая 1970 г. показали, что сдвиговые параметры прослоев известковистых глин составили значения, меньшие ранее определенных $f = 0,17$, $C = 0$.

Геодинамическая картина в створе гидроузла характеризуется несимметричностью, гравитационной неуравновешенностью береговых массивов: высокому левому берегу противостоит низкий, разбитый перекрестной системой трещин и подрезанный логом Калудалкал, на порядок более водопроницаемый массив правого берега. Литостатическая неравномерность берегов, многократные землетрясения, сезонные колебания уровня водохранилища с размахом 40 м, иногда и более, постоянно провоцируют оползневые смещения по крупным тектоническим и сколовым сей-

смогненным трещинам, например № 150, 46, 549, 815 и др. Быстрые и медленные движения вмещающего массива и его отдельных частей с генеральным юго-восточным вектором (к водохранилищу и к правому берегу) передают односторонние нерасчетные нагрузки на арочную плотину, трансформирующие ее проектное напряженно-деформированное состояние.

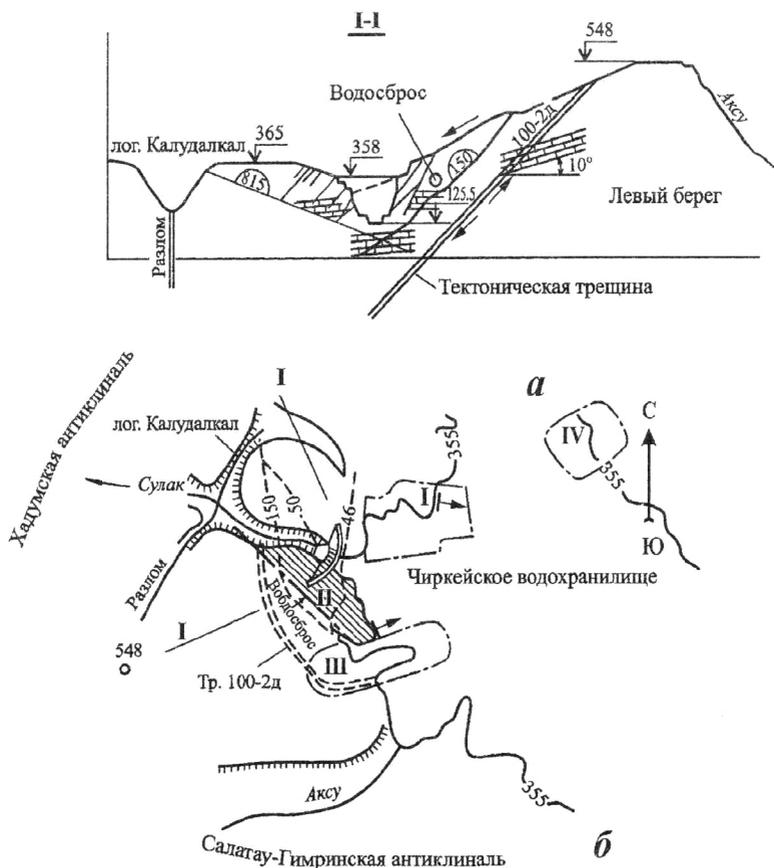


Рис. 20. Геотектоническая схема в районе створа Чиркейской ГЭС: а – разрез по I–I, б – план I и IV – потенциально неустойчивые массивы Заштрихован предполагаемый оползневой массив

Прежде всего обращает на себя внимание вектор движения левого берега и левобережного примыкания плотины (рис. 21), большая его осадка, отмеченная нивелировками на всех горизонталях галерей и штолен. Такое направление векторов смещений потенциально опасно для тоннельного эксплуатационного водосброса, расположенного в левобережном массиве. Наибольшее смещение наблюдается вдоль разлома Калудалкал. Аномальным

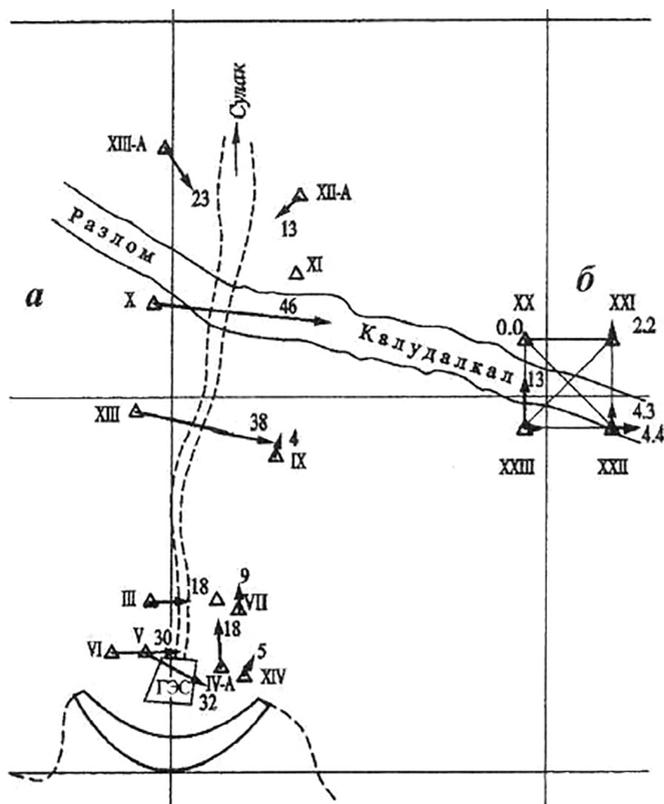


Рис. 21. Схема смещений горных массивов в районе створа Чиркейской ГЭС по состоянию на IX.1993 г. (мм) М 1:1 (а); б – тектонические движения по разлому Калудалкал

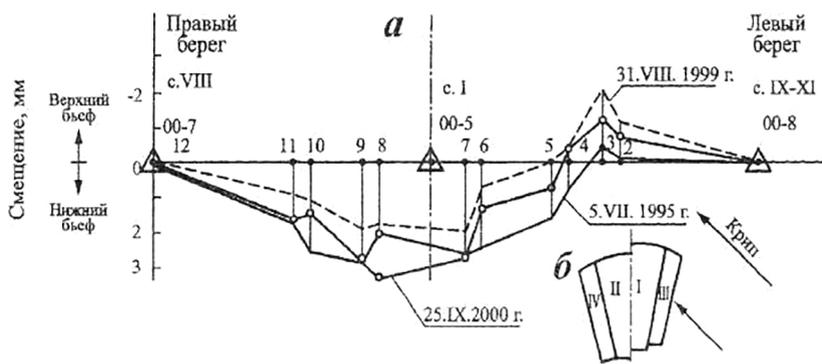


Рис. 22. Горизонтальные смещения пробки в основании русловой части плотины Чиркейской ГЭС за период 1991–2000 гг.:

a – расположение марок в галерее на отм. 130 м, *б* – план пробки

по отношению к основной нагрузке является горизонтальный сдвиг левобережного сопрягающего блока русловой пробки плотины в сторону верхнего бьефа (рис. 22). Обе эти особенности деформирования могут быть объяснены давлением со стороны потенциально оползневого левобережного массива. Такое движение зафиксировано Ленгидропроектом теодолитной съемкой в верхней части трещины № 100 2Д: абсолютная величина перемещения за весь период наблюдений с 1985 по 1991 г. составила здесь 206 мм, т. е. средняя скорость движения достигала в среднем 34 мм в год.

Существует еще несколько косвенных доказательств отмеченного крипового давления – вынос глинки трения с выдавливанием ее из дренажных скважин в галереях и штольнях плотины, скачкообразные изменения пьезометрических уровней в пьезометрах с водоприемниками у трещин № 150 и 815, развитие трещин в подпорных стенках крепления левого берега, аномалии магнитного поля по левобережному борту водохранилища [Сулейманов, Алиев, 1989] и фильтрация по правому берегу. Как правило, интенсификация упомянутых процессов связана по времени с сейсмическими событиями и высокими УВБ, что

свидетельствует об их сейсмогенном характере и связи с возбужденной сейсмичностью.

Наиболее важным следствием геодинамического влияния является установление необратимого переформирования картины напряжений в арочной плотине от нерасчетного внешнего воздействия. Вместо близкого к симметричному распределения арочного сжатия, имевшего место в первые 10 лет эксплуатации, возникло несимметричное распределение арочных напряжений под влиянием давления на левый борт плотины с разгрузкой верхней части правобережного крыла арки и значительным увеличением сжатия в нижней части примыкания к правому берегу. Так, на отм. 325 м сжатие в арочном направлении у сопрягающей левобережной секции XVII увеличилось с 1,3 МПа по состоянию на октябрь 1979 г. до 1,8 МПа в сентябре 1992 г., а на правом берегу уменьшилось, соответственно, с 2,4 до 0,6 МПа. Максимальное значение сжимающих напряжений на отм. 240 м в ключевой секции за этот же период увеличилось с 10,4 до 12,1 МПа.

В зоне отм. 215 м правобережного примыкания сжатие увеличилось с 7,6 до 9,5 МПа у верховой грани и с 8,4 до 9,0 МПа у низовой. Самый высокий максимальный относительный прирост арочных напряжений в этой зоне и составил 1,9 МПа, или на 25 % от уровня 1979 г.

Разгрузка арок в верхней части компенсируется увеличением консольных напряжений, особенно заметным у правобережных секций с ростом максимума с 7,2 до 9 МПа, также на 25 % в зоне отм. 215 м. В этом отношении в наиболее невыгодном положении оказался турбинный водовод IV секции, первым принимающий на себя несвойственную роль контрфорса.

Как следует из рассмотрения плана смещений пробки на отм. 130 м, а также картины перераспределения напряжений и главных векторов перемещений у гребня под воздействием нерасчетной нагрузки со стороны левого берега, происходит «пропеллерная» депланация арочных сечений плотины с разгибанием левобережного крыла и «скручиванием» правобережного (рис. 23).

Весьма вероятно, что точка перелома этой пропеллерности проходит по шву между секциями I и III по границе со стационарным блоком секций большей жесткости. По исследованиям в сентябре именно этот шов по данным трех щелемеров во время толчков 19–25 сентября 1992 г. показал максимальную глубину и величину раскрытия – до 14,5 мм на низовой грани, тогда как соседний шов I–II не раскрылся. Кроме того, именно в районе шва I–III меняет знак эпюра плановых смещений пробки на отм. 130 м (рис. 22).

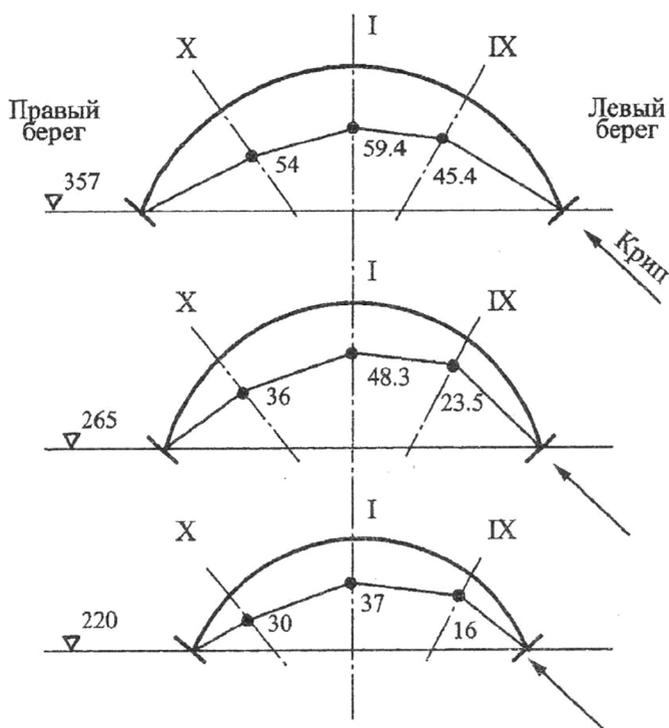


Рис. 23. Схема радиальной депланации арочных поясов плотины Чиркейской ГЭС по показаниям отвесов по состоянию на декабрь 1994 г. (мм). I, IX, X – номера секций

Наблюдения за гидрогеодинамическим режимом в основании плотины были важны с точки зрения оценки состояния вмещающего массива горных пород и его реакции на сейсмические события. Было установлено, что нижний ярус пьезометров с оголовками на отм. 163 м очень слабо реагирует на изменения УВБ. Из 38 наблюдаемых пьезометров при повышении УВБ на 5 м, 7 приборов не изменяли своих показаний, 7 приборов на правом берегу увеличили уровень на 0,8–0,9 м, все остальные – на 0,1–0,7 м. Возможно, что водоприемники этих пьезометров заполнены пластичной глиной, выжатой из прослоек криповым давлением. Более чувствительными показали себя правобережные пьезометры выше отметки 240 м. Заметно более активны пьезометры с водоприемниками у трещин № 150 и 815-д.

Вполне возможно, что именно эта система трещин и образует потенциально опасную поверхность скольжения всего оползневого левобережного массива, заштрихованного на рисунке 20. Характерно, что слабые толчки землетрясения 9 июня отметили повышением уровня на 0,1–0,3 м именно пьезометры у трещины № 815-д. Если проследить хронологию скачкообразных аномалий в пьезометрах нижнего яруса, то высказанная версия также подтверждается. Значительные необратимые изменения пьезометрических уровней начались в 1976 г., после Черногорского землетрясения, когда более чем на 100 м «прыгнул» уровень пьезометра № 101 на левом берегу, в зоне влияния трещины № 150 (рис. 24). Позже необратимые падения пьезометрических уровней последовательно развивались в сторону правого берега, по направлению вектора крипа.

Если обратиться к фильтрационным расходам как индикатору напряженного состояния береговых примыканий, то можно проследить изменение во времени соотношения «пропускной способности» потока обходной фильтрации правого и левого берегов. В 1976 г., после первого наполнения водохранилища, максимальный фильтрационный расход при НПУ через правый берег был в 7 раз больше левобережного, а соотношение максимальных расходов было 5:1. С течением времени неравномер-

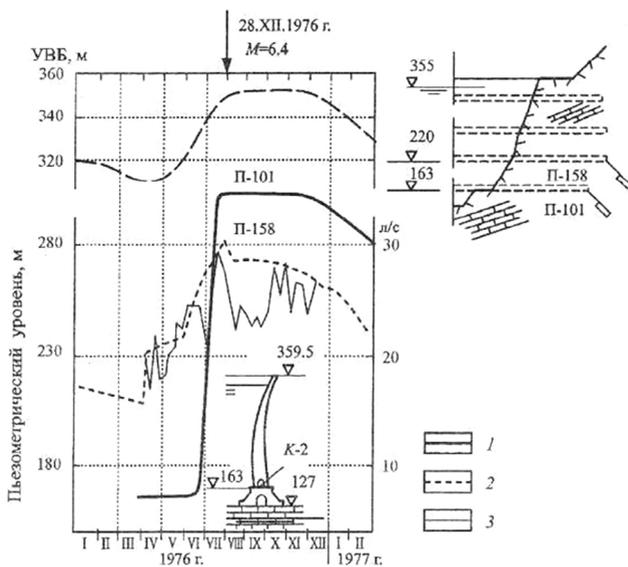


Рис. 24. Показания пьезометров и расходомеров Чиркейской плотины в период Черногорского землетрясения на Кавказе 28.07.1976:
 а – схема размещения пьезометров в цементационных штольнях левого берега
 1 – пьезометр 101, 2 – пьезометр 158,
 3 – фильтрационный расход в коллекторе К2

ность возрастала, достигнув максимума по минимальным расходам в 1988 г. (17:1), а по максимальным расходам в 1989 г. (11,3:1). По нашему мнению, это был период максимального гравитационного и сейсмогенного уплотнения левобережного оползневого массива и разуплотнения правого, ослабленного фильтрацией. В 1991 г. через правый берег фильтровало в 6,1 раз больше, чем через левый при максимальном УВБ, и в 13,5 раз больше при минимальном УВБ.

В ноябре 1991 г. после сильных дождей на правобережном откосе за плотиной произошло обрушение массива пород объемом около 5000 м^3 . Кроме очевидного вывода о резкой неравномерности фильтрационных свойств правобережного и левобережного

массивов можно сделать заключение, что граница водонепроницаемой части левобережного массива значительно выше, чем правобережного, и криповая нагрузка со стороны левого берега на ослабленный правый вызвала предельные скалывающие напряжения на часть правобережного упора. Этому процессу способствовали частые землетрясения и обильные осадки. Несущая способность откоса была восстановлена его обетонированием. Тенденция смещения сооружения к правому берегу от сейсмических воздействий сохраняется, эти смещения носят в основном обратимый характер, но остаточная компонента на верхних отметках всегда имеет место и направлена в сторону левого берега. Такое перемещение с наклоном плотины к левому берегу характерно для движения по круглоцилиндрической поверхности скольжения, которую, вероятно, образуют трещины № 815-д и 150 или другие, более глубокие, такого же направления.

Вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы:

1. Высокий уровень сейсмичности в СФО Дагестанский клин существенно влияет на напряженное и деформированное состояние Чиркейской арочной плотины. Указанное влияние можно контролировать с помощью средств измерения, заложенных в плотину и оперативной информации о сейсмологических условиях региона со станций ДагФГС РАН.

2. По данным ретроспективного анализа материалов натуральных наблюдений с учетом сейсмических событий за весь период эксплуатации Чиркейской ГЭС и специальных исследований, арочная плотина подвергается нерасчетным геодинамическим воздействиям. Эти воздействия проявляются в виде разновекторных сейсмических толчков различной силы, передаются на сооружение через основание и берега, через гидродинамическое давление обходного фильтрационного потока по правому берегу и криповое давление со стороны более высокого левого берега. По предварительным данным, на плотину Чиркейской ГЭС действует вес потенциально-оползневого массива левого берега, движение которого в сторону водохранилища и правого

берега по глинистым поверхностям простирания трещин № 150 или № 100-2Д обусловлено склоном Хадумской антиклинали, стимулируется обходной фильтрацией, атмосферными осадками, возбужденными землетрясениями и природной сейсмичностью.

3. Безопасность и надежность плотины в решающей степени зависят от состояния вмещающей геологической среды, что требует совершенствования измерительных систем именно в этом направлении с учетом динамического характера воздействий. В частности, целесообразно усовершенствовать водомерные посты, оборудовать цифровыми деформометрами трещины № 150 и 100-2Д, автоматизировать отвесы, усилить наблюдения за разломом Калудалкал.

4. Исследованиями выявлена возможность идентификации предвестников сильных землетрясений с помощью измерительных систем плотин, в частности – непрерывного контроля над изменением фильтрационных (дренажных) расходов через основание, температуры дренажных вод и измерений пьезометрического уровня. При подготовке землетрясения дренажные расходы, как правило, снижаются (23 случая из 29 рассмотренных или 79,3 %), а после толчка – возрастают. Из 14 землетрясений $K \geq 11$ на период подъема УВБ приходится 12 или 86 % случаев. Обратный график, когда предвестником является не снижение, а повышение расхода, приходится в основном на глубины гипоцентров $h = 30$ км и более в районе Каспия. Толчки возбужденной сейсмичности с эпицентрами в районе створа ГЭС имеют, как правило, низкий энергетический класс (из 12 случаев 8 энергетического класса $K = 9$, два $K = 10$). В распределении этих толчков есть некоторая регулярность, прямо зависящая от скорости изменений УВБ.

Предвестники сильных землетрясений энергетического класса 13 и более при глубинах гипоцентров порядка 30 км имеют в графиках суммарных фильтрационных расходов вид резких флуктуаций с увеличением до 50 % вне зависимости от УВБ

и появляются за 25–30 суток до события. Слабые толчки предвараются изменением расходов на 10–20 % за 4–7 сут.

Кроме ГГД-предвестников можно использовать в прогностических целях показания отвесов, струнных датчиков при условии их автоматизации и геодезические наблюдения за смещениями в разломе Калудалкал.

5. Анализ сейсмического режима Дагестана за период 2013–2019 гг. показал активную триггерную роль возбужденных землетрясений вблизи водохранилища Чиркейской ГЭС с постепенным увеличением глубины очагов.

3.5. Зейская ГЭС

Район Зейского водохранилища расположен на границе Алдано-Станового и Амурского геоблоков, испытывающих дифференцированные движения разного знака: Алдано-Становой блок испытывает поднятие, Амуро-Зейская впадина – опускание. В неотектоническом отношении здесь выделяются Становое, Верхне-Гилуйское, Майское и Тукурингро-Джагдинское глыбовые поднятия с одной стороны, а с другой – Верхне-Зейская впадина и Амуро-Зейская плита. Границы неотектонических структур ясно выражены в рельефе местности и геодинамической неоднородности. Северная часть долины р. Зeya в пределах хребта Тукурингра-Соктахан является жестким блоком со среднегорным рельефом и поднимается, а центральная, мульдовая, часть испытывает погружение. Южные части Верхне-Гилуйского поднятия и Верхне-Зейской впадины тоже поднимаются [Шпаковский, 1980]. Сеймотектонические условия района определяются именно указанной границей, которая представлена Пиканским разломом, расположенным на расстоянии примерно одного км от плотины со стороны нижнего бьефа.

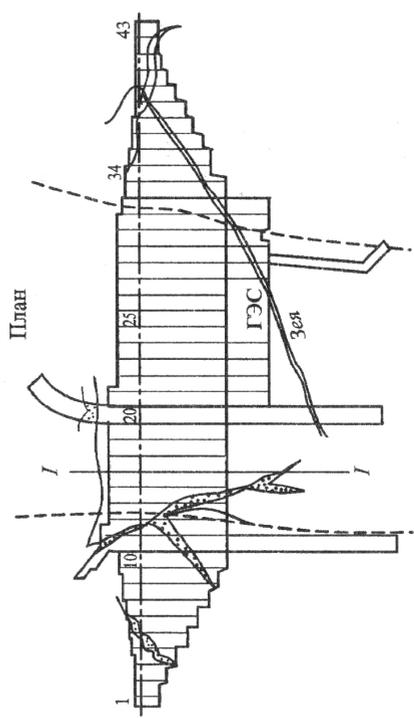
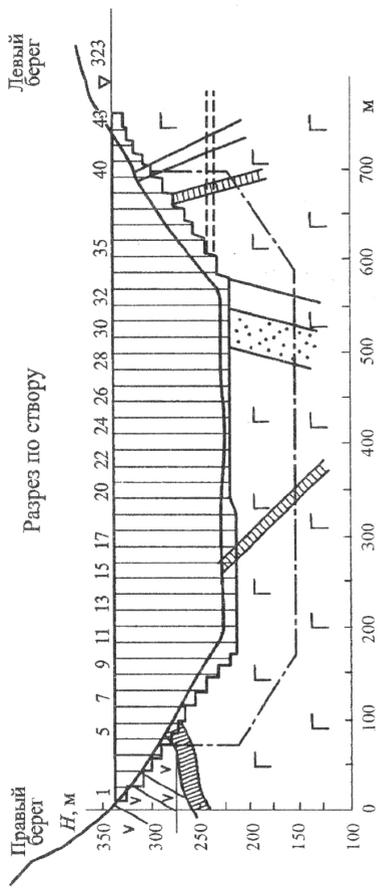
Массивная контрфорсная плотина Зейской ГЭС высотой 110 м, длиной по гребню 714 м, с объемом бетона 2,5 млн м³ создает крупное водохранилище емкостью 68,4 км³ с призмой сработки высотой 16 м и полезным объемом 38,3 км³.

Основание плотины сложено гнейсовидными диоритами с дайками лампрофиров. В основании вскрыты три тектонические зоны: в пределах водосливной плотины и водобойной плиты, в левобережном примыкании и в середине русла перед напорной гранью (рис. 25). Временное сопротивление сжатию диоритов в водонасыщенном состоянии составляет 50–200 МПа, параметры сопротивления сдвигу $f = 0,7$, сцепление $C = 0,3$ МПа, модуль деформации скального массива основания в среднем $10 \cdot 10^3$ МПа.

Имеющиеся схемы ближайших к плотине разломов, составленные В. П. Солоненко [1977] и Л. С. Оскорбиним, мы уточнили по результатам нивелирования воронки оседания, выполненного экспедицией № 8 Ленгидропроекта и геодезической службой Зейской ГЭС (рис. 26). В соответствии с исследованиями Южно-Сахалинской опытно-методической сейсмологической партии /ЮСОМСП/ Дальневосточного отделения РАН, основными сейсмогенерирующими разломами являются субширотные, глубинные, с почти вертикальным падением Южно-Тукурингский и Северо-Тукурингский разломы и места пересечений с ортогональными к ним разломами второго порядка — Абанским и Зейским. Уровень интенсивности сейсмической активности на территории Зейского приводохранилищного района определялся в проектном задании в 6 баллов, но после Зейского землетрясения 2 ноября 1973 г. с эпицентром на р. Б. Тында повышен до 7 баллов, а картой ОСР-97 установлен 9 баллов (ОСР-97 С).

С начала наполнения водохранилища в 1975 г. силами ЮСОМСП проведены тщательные исследования возбужденной сейсмичности. За 10 ежегодных циклов наполнения и сработки водохранилища в период с 1975 по 1985 г., когда был достигнут его проектный уровень, в районе зарегистрировано 24 землетрясения энергетического класса $K \geq 10$, значительная их часть отнесена к категории возбужденных.

За период нормальной эксплуатации при НПУ 315 м с 1986 по 1994 г. в приводохранилищном районе произошло еще 21 землетрясение энергетического класса $K \geq 10$, наиболее сильные из которых представлены в таблице 9.



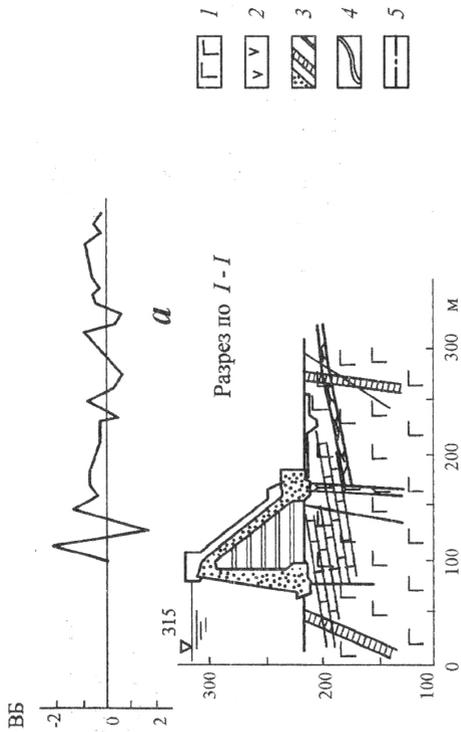


Рис. 25. Геоструктурная схема основания Зейской ГЭС (по Шпаковскому):
 1 – диорит, 2 – диорит кварцевый, 3 – тектонические зоны,
 4 – крупные трещины, 5 – цемзавеса, а – горизонтальные смещения

Характерной особенностью расположения очагов землетрясений является их соосность с тукурингрскими и соктоханскими разломами, которые ориентированы параллельно оси плотины. Это создает условия для преимущественно поперечной направленности сейсмических воздействий, наиболее неблагоприятной для контрфорсной плотины.

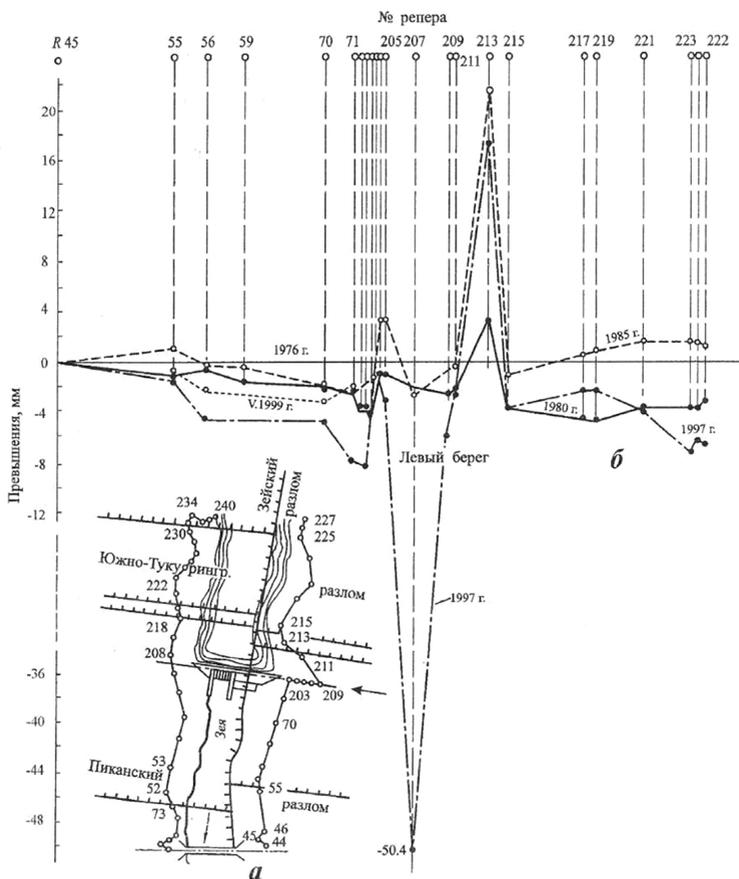


Рис. 26. Вертикальные тектонические и блоковые движения по данным нивелировок воронки оседания в районе створа Зейской ГЭС за период 1976–1997 гг.:

а — план нивелирных ходов, *б* — нивелировки левого берега

Таблица 9

Землетрясения $K > 10$ в районе створа Зейской ГЭС

Дата	Координаты		Глубина очага, км	Расстояние от очага, км	Параметры		Примечания
	λ	φ			K	M	
09.VII.86	54,7	126,5	–	150	10,7	3,9	
30.VII	54,0	123,5	–	260	11,3	4	
07.VIII	55,0	123,4	–	320	12,7	5,8	Тында – 4 балла
19.VI.88	55,8	128,8	2	230	10,6	3,5	
02.XII	53,9	126	2	70	10,7	3,6	
23.VI.89	54,5	124,9	–	180	13,5	5,3	
14.X.93	–	–	–	–	12,2	4,0	
19.IV.94	–	–	15	240	11,6	4,2	Тында 3 – 4 балла
17.I.2004	–	–					Зея – 4 балла

По данным Ф. Г. Корчагина [Корчагин, 1983, 1989, Корчагин и др., 1985], для участка створа Зейской ГЭС характерны активные блоковые движения. Локальное поле тектонических напряжений в створе характеризуется горизонтальным субмеридиональным сжатием (почти вдоль русла) и высоким, близким к критическому, уровнем касательных напряжений на отдельных участках. Из тектонических нарушений в створе выделяются крупные трещины мощностью до 0,5 м в береговых примыканиях в районе секций 3–6 и 36–40. В русловой части зоны развитой трещиноватости отмечены в основании секций 10, 13–16 и 26–29, где фиксируются максимальные осадки и фильтрационные расходы (рис. 25). По нашему мнению, неопределенно протрассированный Зейский разлом проходит по руслу р. Зеи именно в основании секций 26–29. Это место обозначено максимальными горизонтальными смещениями, фильтрационными расходами, осадками и высокой чувствительностью дебита дренажных скважин к сейсмическим событиям.

В сеймотектоническом и геологическом отношении особенности створа можно подытожить замечанием В. П. Солоненко о том, что при сильном транзитном сотрясении или местном очаге землетрясения возможны блоковые перемещения по ослабленной зоне, которые вызовут мощные скалывающие напряжения в теле плотины. Таким образом, сложившаяся сейсмологическая ситуация в районе Зейской ГЭС требует тщательного контроля напряженно-деформированного состояния контрфорсов и швов между ними, сейсмометрического контроля с определением расчетных параметров для динамических поверочных расчетов и отработки методики прогнозирования опасных геодинамических процессов. Не случайно график горизонтальных и вертикальных смещений имеет максимумы в местах тектонических нарушений и развитой трещиноватости (рис. 25, 26).

Напряженно-деформированное состояние плотины Зейской ГЭС определяется не только действием основных расчетных нагрузок и изменениями температуры, но и геодинамическими процессами в окружающей геологической среде. Эти процессы проявляются в створе в виде медленных и быстрых движений земной коры, блоковых подвижек, вызывающих дополнительные напряжения в статически неопределимой конструктивной схеме плотины, в которой контрфорсы соединены многочисленными горизонтальными связями. Дифференцированная работа берегов вызывает нерасчетные скалывающие напряжения, которые в значительной мере компенсируются в межсекционных швах. Воздействия же, направленные вдоль створа плотины, реализуются в приращениях нормальных напряжений в оголовках контрфорсов и конструкциях перекрытий полостей того же направления, поскольку свобода деформаций здесь практически отсутствует. Импульсные сейсмогенные смещения вызывают остаточные деформации практически по всем измеряемым параметрам, однако эти деформации могут восстанавливаться, изменять знак с течением времени, по мере развития процесса обмена энергией между вмещающей средой и сооружением. Основное отличие фактического НДС плотины от расчетного

заклучается в относительно высоком уровне напряжений, действующих вдоль створа, поскольку все расчеты выполнены для условий плоской задачи. По данным СибВНИИГ, максимальные значения сжимающих напряжений отмечены в оголовке контрфорса секции 17 на отм. 225 м и на расстоянии 4,5–8 м от напорной грани со значениями $\sigma_z = 7,6\text{--}17,4$ МПа. У низовой грани этого контрфорса на той же отметке наблюдается растяжение до 2,5 МПа. В оголовке контрфорса с. 25 на отм. 225/5 м значения продольного сжатия несколько меньше и равны $\sigma_z = 6,4\text{--}5,7$ МПа, а растяжение у низовой грани достигает 3 МПа, что примерно соответствует предельной растяжимости бетона и означает возможность появления трещин. Такие трещины наблюдаются на низовой грани правобережных секций и в устье правого берега. Возможно, они вызваны подвижками массива правого берега в сторону верхнего бьефа по наклонной складчатости и трещинам, ослабленным взрывными работами в период строительства. К сожалению, на откосе правобережного примыкания геодезические знаки отсутствуют.

В левобережной секции 32 максимальное сжатие в направлении оси плотины имеет место на низовой грани на отм. 219,5 м, а растяжение до 1,8 МПа – в оголовке контрфорса на расстоянии 1,5–13 м от напорной грани. Изложенная картина распределения напряжений вполне соответствует общему характеру смещений по створу оси плотины.

Анализ изменений горизонтальных напряжений вдоль створа σ_z во времени показывает, что за период нормальной эксплуатации прослеживается устойчивая тенденция приращений этих напряжений: до 0,5 МПа растяжения и сжатия в секции 22 за 4 года с 1987 по 1990 г., до 0,3–0,4 МПа в с. 17 и с. 25. Весьма вероятно, что причиной такой тенденции является крип со стороны более высокого правого берега, где потенциальные плоскости сдвига в породах наклонены в сторону левого берега и верхнего бьефа. Кроме того, массив правобережного примыкания отличается значительной обходной фильтрацией с высачиванием на откосе в нижнем бьефе, который зимой обмерзает. Одной из

причин такого положения является неудачная технология разработки правобережной врезки с рыхлением породы взрывами в штольнях, что разуплотнило горный массив примыкания.

Другим важным отличием фактического НДС от расчетных предположений является существенно неравномерное распределение напряжений по сечениям контрфорсов. Эта неравномерность связана с поперечными деформациями и перемещениями контрфорсов, вызванными неравномерными осадками и прогибами плотины из-за различий в деформативных свойствах основания, конструктивных особенностей секций и, возможно, блоковых движений в основании. По показаниям многоярусных отвесов (рис. 27) можно судить о том, что поперечные деформации и напряжения передаются вдоль створа по конструкциям перекрытий полостей. Из рисунка 27 также следует, что размахи колебаний секций по осям X и Y уменьшаются по мере роста напора и напряжений, направленных вдоль оси плотины, а секция 25 постепенно наклоняется в сторону левого берега. Это также может быть свидетельством крипового давления со стороны правого берега.

Степень неравномерности нормальных напряжений по горизонтальным площадкам в нижней части контрфорса секции 25 иллюстрируется показаниями вертикальных деформометров в створе розеток блока 25-1-10-2 (рис. 27, а). По характеру эпюры деформаций можно предположить, что причиной частичного раскрытия контакта скала—бетон под напорной гранью могут быть поперечные деформации контрфорсов. Отметим, что по проекту открытие контакта не предусматривалось. Более поздними расчетами Ленгидропроекта была установлена возможность его раскрытия на длине 2,7 м. Натурными наблюдениями при НПУ 315 м в 1989 г. в с. 25 (блок 25-1-4.5-1) на расстоянии 10,4 м от верховой грани зафиксировано растяжение в пределах (47,7—53,5) 10^{-5} отн. ед. а в с. 32 на расстоянии 3,5 м от верховой грани — до $122 \cdot 10^{-5}$ с ростом во времени. Большая величина раскрытия трещины в основании прибрежной секции подтверждает предположение о поперечной деформации как причине такого

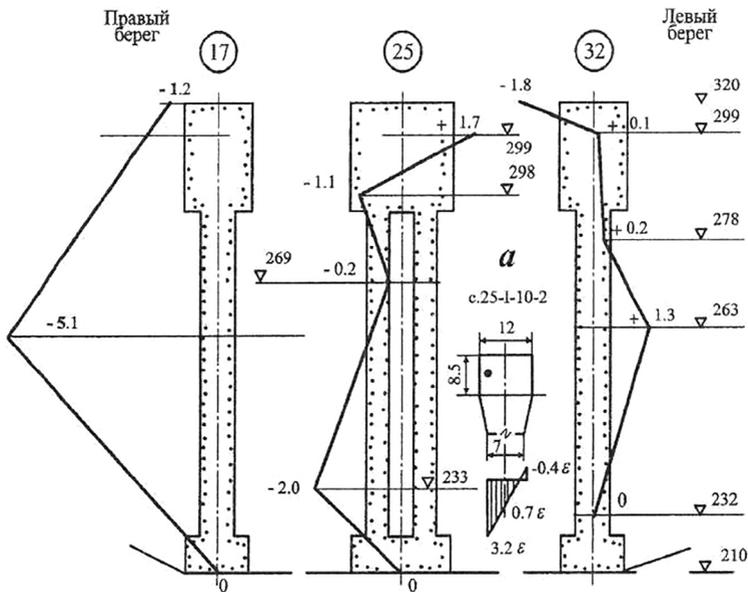


Рис. 27. Поперечные деформации контрфорсов плотины Зейской ГЭС из-за геодинамических воздействий по показаниям прямых отвесов, 1994 г.
a – неравномерность деформаций в напорном оголовке секции 25

раскрытия. Об этом же свидетельствует и наличие деформаций растяжения на контакте у граней низового, VI, столба секции 25. Известно, что от гидростатического давления под низовым клином плотины всегда имеет место максимальное сжатие, исключаяющее раскрытие контакта, так что наблюдаемое растяжение является аномальным.

Ретроспективный анализ материалов натуральных наблюдений совместно с региональным каталогом землетрясений показывает наличие отклика измерительных систем плотины на наиболее сильные и близкие сейсмические события. Наиболее чувствительны к геодинамическим влияниям дренажные расходы, отвесы, пьезометры, контактные деформометры. На рисунках 28 и 29 представлены примеры реакции обратных отвесов в береговых

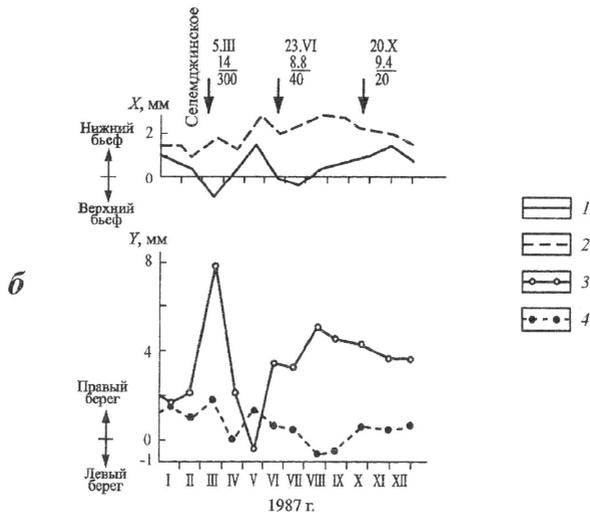
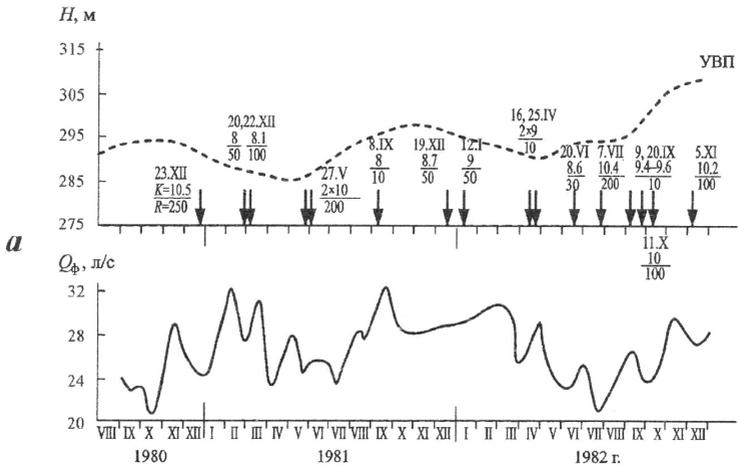


Рис. 28. Реакция фильтрационных расходов и обратных отсесов плотины Зейской ГЭС на сейсмические события: *a* – изменения УВП, сейсмособытия и график суммарных фильтрационных расходов, *б* – откаты обратных отсесов в береговых сечениях плотины по осям X (вдоль течения) и Y (поперек течения).
 1 – ссекция 1а, отм. 320 м; 2 – ссекция 43, отм. 320 м;
 3 – ссекция 1а, отм. 316 м; 4 – ссекция 43, отм. 316 м

устоях плотины и контактного деформометра на близкие, в пределах 100 км сейсмические толчки энергетического класса $K = 8-10$ и более дальние (до 350 км) землетрясения $K = 12-14$. Из рисунка 28, б видно, что наибольшие размахи сейсмогенных колебаний наблюдаются по оси Y – вдоль створа – и со стороны правого

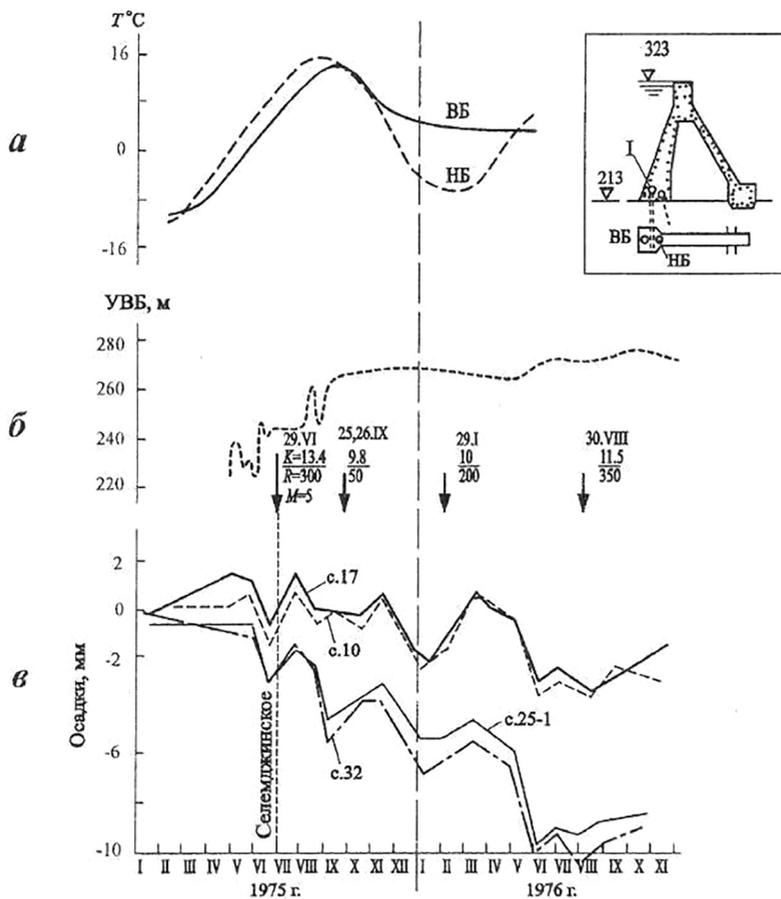


Рис. 29. Осадки основания секций 10, 17, 25, 32 плотины Зейской ГЭС по нивелировкам марок в цементационной галерее № 1:
 а – температура бетона оголовка, б – изменения УВБ и сейсмособытия, в – график осадок секций

берега, который, по данным ЮСОМСП, более активен в сейсмическом отношении. Рисунок 29 показывает, что на фоне общей зависимости деформаций на контакте от УВБ наиболее значительные флуктуации деформаций совпадают по времени с сейсмическими событиями синхронно у нескольких секций. Как и у других бетонных плотин, контакт со скальным основанием под напорной гранью является самым чувствительным местом при сейсмическом воздействии.

В итоге можно констатировать, что напряженное состояние плотины Зейской ГЭС существенно отличается от проектного: вместо полученных по расчету максимальных нормальных сжимающих напряжений в низовом клине плотины 2 МПа измеренные по деформациям напряжения имеют значения 7,6–17,4 МПа в оголовке с направлением вдоль створа. Вместо отсутствующих по расчету растягивающих напряжений, в некоторых точках фиксируются деформации растяжения на уровне предельной растяжимости бетона. Такое отличие невозможно объяснить только традиционными технологическими причинами и температурными напряжениями строительного периода, тем более что способы разрезки, терморегулирования и омоноличивания плотины обеспечили высокую степень релаксации их. По нашему мнению, это результат несоответствия расчетной модели реальным условиям работы сооружения. Важнейшие реалии — это неучтенные в расчете влияния конструкций перекрытий полостей, объединяющих контрфорсы в единую конструктивную систему и передача по ним геодинамических сил со стороны берегов и, возможно, от блоковых движений в основании. Высокие местные концентрации напряжений вызваны, вероятно, передачей крипового давления со стороны более высокого правого берега вдоль створа по балкам перекрытия полостей, замоналиченным в контрфорсы. Это означает, что чисто конструктивная система перекрытий полостей приняла на себя роль антисейсмических поясов и должна рассматриваться именно в этом качестве как дополнительный запас прочности на действие поперечных к руслу геодинамических нагрузок.

Анализ фильтрационного режима по ряду наиболее чувствительных дрен в основании прибрежных секций плотины и по суммарному потоку показал, что аномальные изменения дебита дрен и притока приурочены к сейсмическим событиям (рис. 28, а). При этом максимальные размахи колебаний расходов отмечены ближе к левому берегу в зоне руслового разлома под секцией 29. Для района створа Зейской ГЭС характерны блоковые движения, обнаруженные специальными исследованиями Ф. Г. Корчагина [Корчагин и др., 1985] и подтвержденные нивелировками геодезической службы ГЭС в пределах воронки оседания. Подобные движения фиксируются также автоматизированными обратными отвесами и связаны по времени с сейсмическими событиями. Дискретный характер осадки секций плотины, слабо корректирующий с изменениями УВБ (рис. 29), также свидетельствует о наличии блоковых движений в створе плотины, тогда как неравномерность осадок может нарушить водонепроницаемость противofильтрационных уплотнений в межсекционных швах.

Изложенные результаты анализа натуральных наблюдений и сейсмологических исследований ЮСОМСП позволяют сделать следующие выводы.

1. Плотина Зейской ГЭС эксплуатируется в условиях, отличных от проектных предположений из-за влияния неучтенных в расчете геодинамических сил – природной и возбужденной сейсмичности с преимущественным «поперечным» направлением сейсма (вдоль створа плотины поперек русла), весьма неблагоприятным для контрфорсного типа плотины.

2. Исследования ЮСОМСП выявили существенное влияние водохранилища на сейсмическую активность приводохранилищного района, приуроченность эпицентров слабых землетрясений к бортам водохранилища. Со стабилизацией уровня сейсмичность района снижается. Наиболее сильные землетрясения происходили после быстрого повышения уровня УВБ с некоторым запаздыванием. Характер влияния Зейского водохранилища различен для окраинных участков на расстоянии 40–100 км от оси глубоководной части водохранилища и береговой территории

(0–40 км). Для отдаленных участков зависимость между суммарной сейсмической энергией и скоростью подъема УВБ является прямой, коэффициент корреляции ($r = 0,70$), а для близких – наоборот. При сработке водохранилища наблюдается обратная картина – на расстоянии 0–40 км от оси водохранилища зависимость прямая, а на расстоянии 40–100 км – обратная.

3. По результатам геодезических наблюдений следует, что для района створа Зейской ГЭС характерны дифференцированные блоковые подвижки, которые могут оказывать влияние на смещения в межсекционных и межстолбчатых швах плотины, на прочность и водопроницаемость этих швов, которые уже имеют локальные протечки в уплотнениях.

4. Возможность крипа со стороны правого берега требует контроля за смещениями правобережного откоса и напряженным состоянием балок перекрытия полостей между контрфорсами, за поперечными деформациями контрфорсов и трещинами на низовой грани правобережных секций.

5. Измерительные системы плотины Зейской ГЭС, как и в предыдущих случаях, реагируют на подготовительный период землетрясений и их воздействие на сооружение. Наиболее чувствительны к геодинамическим нагрузкам дебит дрен, пьезометрические уровни, прямые и обратные отвесы, которые требуют непрерывных наблюдений.

6. С учетом резкого повышения расчетной сейсмичности района расположения Зейской ГЭС (с 6 до 9 баллов по карте ОСР-97) и недостаточной сейсмостойкости рядом расположенных крупнопанельных домов пос. Светлый, существует настоятельная необходимость организации службы сейсмического контроля и прогнозов на Зейской ГЭС с использованием метрологических возможностей действующих измерительных систем плотины и куста ближайших сейсмостанций.

7. Имеющиеся повреждения раздельной стенки между зданием ГЭС и водосливной плотиной, а также размывы зоны тектонических нарушений в нижнем бьефе за водосливом должны быть отремонтированы.

3.6. Бурейская ГЭС

Бурейская ГЭС [Юркевич, Васильев А. и др., 2004] с гравитационной плотиной высотой 140 м, длиной 719 м образует водохранилище объемом 21 куб. км. Гидроузел расположен в Талаканском створе, в 175 км от впадения р. Буреи в р. Амур. Створ сложен верхнепалеозойскими интрузивными гранитами с четырьмя тектоническими крутопадающими зонами северо-западного простирания. Ближе к створу подходит граница между воздымающимся Буреинским хребтом и опускающейся Приамурской впадиной, в зоне влияния Хинганского и Бурейского рифтов. На более высоком правом берегу проходит разлом северо-восточного простирания с шириной смятия до 10 м (рис. 30). По карте ОСР-97 район имеет сейсмичность 8 баллов. Бурейская ГЭС является первой отечественной ГЭС, в районе створа которой сейсмологические наблюдения начаты до наполнения водохранилища, что позволяет обоснованно различать природную и возбужденную сейсмичность.

С позиций сейсмотектоники район створа представляет собой тектонический узел, образованный руслом реки и поперечным разломом. По данным Института тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН, в 2006 г., когда напор на плотину превысил 90 м, из 122 сейсмособытий 52 землетрясения определены как возбужденные по признакам близости к плотине, глубине гипоцентров, энергии и времени возникновения в период быстрых изменений УВБ. С первых лет наблюдений по развитым измерительным системам в плотине и в основании Бурейской ГЭС определился динамический, флуктуирующий характер графиков всех измеряемых параметров. Эти графики часто отличались нарушением привычных зависимостей от основных расчетных нагрузок – гидростатического давления и температуры воздуха, что характерно для плотин в тектонически нестабильных регионах. Однако результаты измерений на Бурейском гидроузле отличаются существенно большими размахами амплитуд флуктуаций. Более того, обнаружилась необычно высокая

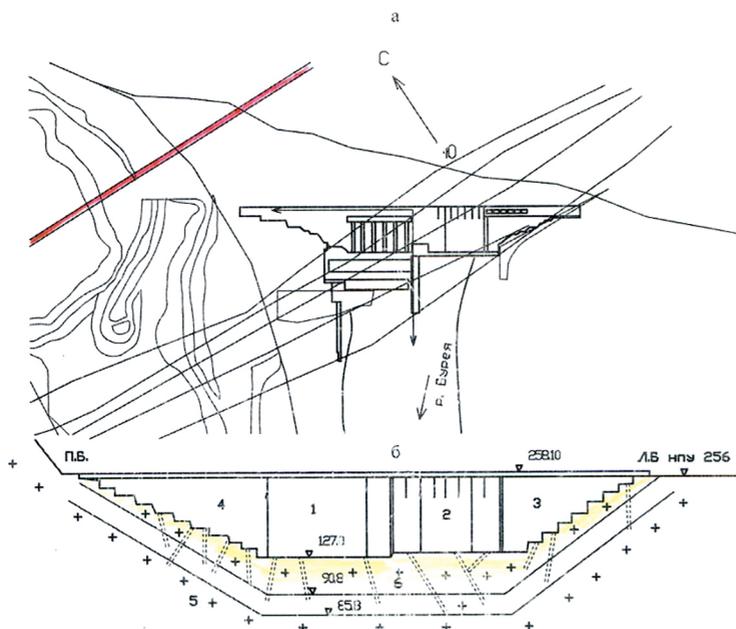


Рис. 30. Геоструктурная схема створа Бурейской ГЭС:
а – план, *б* – разрез по створу, вид с нижнего бьефа:
 1 – здание ГЭС, 2 – водослив, 3 и 4 – береговые секции плотины,
 5 – контур цементационной завесы, 6 – контур дренажа

чувствительность измерительных систем плотины к далеким сейсмическим событиям.

Автоматизированные пьезометры в основании плотины зафиксировали отклик на Курильские землетрясения 15.11.2006 $M = 8,2$ и 13.01.2007 $M = 8$ с эпицентральной дистанцией 1600 км при постоянном УВБ в период регистрации землетрясений. Скачки пьезометрических уровней в глубинном и контактном пьезометрах составили, соответственно, 71 и 70 см. Отмечены случаи подъема пьезометрических уровней выше УВБ, что является следствием изменения поля тектонических напряжений в основании плотины. Наибольший интерес вызывают аномалии в показаниях приборов в основании плотины Бурейской ГЭС в 2010–2011 гг.

В конце февраля – начале марта 2011 г. в основании трех секций плотины фильтрационные расходы увеличились на 5–10 % при монотонном снижении УВБ. В некоторых дренажных скважинах в марте дебит увеличился вдвое. С января 2011 г. обратные отвесы сдвигомеры в основании береговых секций показывали обратимые аномальные смещения до 51 мм на глубине 25,5 м от контакта скала–бетон (рис. 31, *а*). Синхронно с аномальным ростом фильтрационных расходов деформометры в приконтактной зоне бетона плотины скачком отметили увеличение деформаций при снижении УВБ. В этой же зоне контактные пьезометры показали прыжок до 100 м, что означало импульсное открытие контакта в основании напорной грани плотины (рис. 31, *б*).

Имея в виду ранее установленный отклик автоматизированных пьезометров на Курильские землетрясения, можно обоснованно предположить, что комплекс отмеченных аномалий является откликом на подготовку и последствия землетрясения Тохоку с эпицентром на расстоянии 1800 км [Марчук А., Марчук Н., Николаев А. В., 2013]. При этом учитываются выводы Института тектоники и геофизики (ИТГ) ДВО РАН об активности субмеридиональных разломов Бурейской сейсмоактивной зоны, проходящих через район расположения плотины. Эта зона входит в Танлу-Охотскую рифтовую систему, расположенную в непосредственной близости к западной части Тихоокеанского сейсмического пояса.

Предположение о сверхчувствительности измерительных систем Бурейской плотины подлежит проверке дальнейшими исследованиями при условии их совершенствования. Это важно не только для прогностических целей в интересах обеспечения надежности ГЭС, но и в интересах социальной, экономической и экологической безопасности регионов Дальнего Востока.

3.7. Плотина Ингурской ГЭС

Одна из крупнейших в мире арочная плотина высотой 271,5 м, длиной по гребню 758 м, с объемом бетона около 4 млн м³ образует водохранилище емкостью 1,1 км³, расположена на р. Ингури

в Грузии в пределах Гагра-Джавской складчатой зоны на южном склоне Большого Кавказа [Джигаури и др., 1980]. Призма сработки водохранилища имеет высоту 55 м. Район характеризуется повышенной сейсмичностью: в радиусе 50 км вокруг территории гидроузла находятся 15 эпицентров землетрясений с магнитудами $M = 4-6,5$. С учетом непосредственной близости Ингиришского разлома (1–1,5 км) и крупного тектонического нарушения на правом берегу, расчетная интенсивность землетрясения для арочной плотины принята равной 9 баллам.

Основным тектоническим нарушением в районе створа является Ингиришский разлом типа взбросо-сдвига с субмеридиональным простиранием, проходящий западнее участка плотины с шириной смесителя около 10 м. Один из оперяющих его разрывов непосредственно пересекает правобережное примыкание плотины и делит весь массив вмещающего геоблока на две части: блок А – правобережное взброшенное крыло, и блок Б – опущенное крыло, принявшее на себя основную массу бетона плотины. Приразломные правобережные зоны имеют наибольшую трещиноватость и водопроницаемость пород, наиболее сохранной является антиклинальная часть в середине русла (рис. 32).

В период предпроектных изысканий исследовалась степень активности правобережного разлома, пересекающего основание плотины. С этой целью проведены наклономерные измерения с помощью фотоэлектрических наклономеров Островского. С марта 1969 г. до конца 1971 г. проведены наблюдения в двух береговых штольнях с разницей высот 50 м и пересекающих разлом в 120 м от плотины в нижнем бьефе. Установлено, что борта разлома наклоняются навстречу друг другу, сжимая зону смесителя, а оба блока под разными углами наклоняются в сторону водохранилища. Был сделан вывод о том, что это сжатие после водонасыщения будет продолжаться интенсивнее и дифференцированные движения отсутствуют. Исследованиями неотектоники установлено также общее воздымание массива.

Плотина расположена в горном ущелье долины р. Ингури, сложенном карбонатными породами – плитчатыми известняками

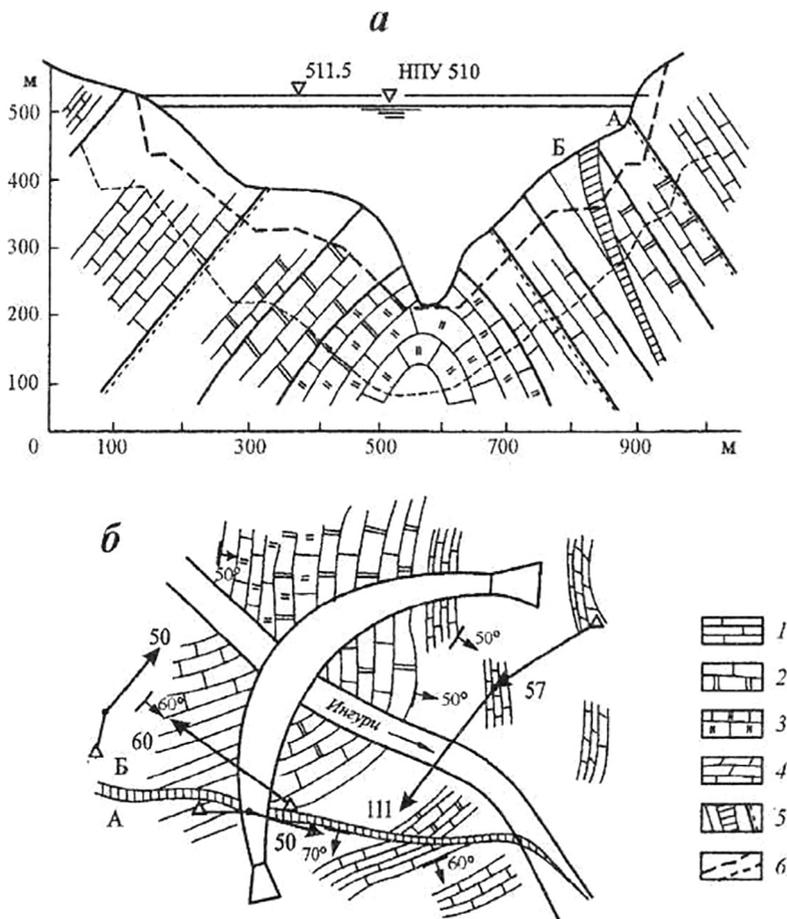


Рис. 32. Геоструктурная схема створа Ингуурской плотины:

a — разрез по створу, *б* — план:

- 1 — известняки средне- и толстослоистые, 2 — известняки и доломиты,
 3 — известняки доломитизированные массивные,
 4 — известняки мергелистые, 5 — разломы и тектонические трещины,
 6 — контуры выемки и цементационной завесы. Стрелками указаны
 смещения знаков геодезической сети за период 1974–1987 гг.

(по Г. И. Кузнецову)

и доломитами с прочностью на сжатие от 80 до 120 МПа в зависимости от степени выветрелости. Значения модуля деформации от $(1-4) \cdot 10^3$ МПа в верхней зоне до $(13-16) \cdot 10^3$ МПа для сохранных пород. Расчетные значения показателей деформативности и сопротивления сдвигу выбраны раздельно для слабых и сохранных пород. В первом случае $E = (2 - 7) \cdot 10^3$ МПа, $f = 0,8$, $C = 0,2$ МПа, для зон с модулем деформации более $(7-10)^3$ МПа, $f = 0,9$, $C = 0,4$ МПа. Указанные значения принимались с учетом реализации проектных мероприятий по укреплению основания: съема выветрелых пород на глубину 15–50 м, укрепительной цементации, заделки крупных тектонических трещин, анкеровки потенциально неустойчивых блоков породы. Правобережное тектоническое разрывное нарушение заделано бетоном на глубину 40–45 м, а до глубины 80–85 м – прерывистыми бетонными столбами через штольни.

Горным способом были заделаны бетоном и крупные тектонические трещины в контуре основания плотины. Следует заметить, что из-за длительного срока строительства и связанного с этим вторичного выветривания в котловане произошло 5 случаев обрушения пород, в основном в зоне правобережного котлована объемом до 3000 м³. К сожалению, эти случаи не связывались с сейсмологическими условиями.

Влияние природной, а затем и возбужденной сейсмичности на деформации основания фиксировались струнными деформометрами и контактными щелемерами еще в строительный период, начиная с 1975 г. (Ю. А. Фишман). Наиболее значительные деформации совпали по времени с Черногорским землетрясением в Чечено-Ингушетии 28.06.1976 с магнитудой $M = 6,4$, $R = 290$ км, $h = 25$ км. Максимальный отклик наблюдался у прибора в русловой части основания, в вершине антиклинали (рис. 33).

В первый период эксплуатации водохранилища (1978–1983 гг.) отмечена активизация деформационных процессов в приразломной зоне. Скорость смещения бортов правобережного разрывного нарушения начала возрастать с момента заполнения водохранилища в 1978 г. и достигла максимума в 1981 г. (рис. 34). Основное

направление наклонов — в нижний бьеф и к правому берегу. Смещение блоков А и Б, как и деформации под плотиной, были в основном обратимыми, в отличие от деформирования береговых упоров, где разгрузка массива в период строительства не компенсирована собственным весом сооружения и арочными напряжениями в начальный период эксплуатации. Геодезическими

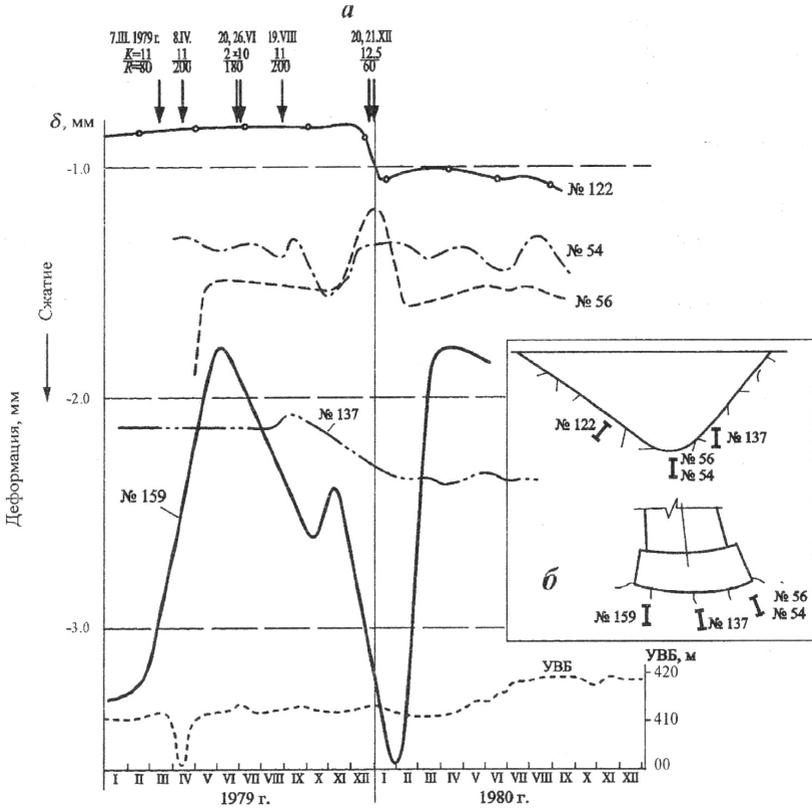


Рис. 33. Показания длиннобазовых скальных деформометров в основании плотины Ингури ГЭС под влиянием землетрясений (по Ю. Фишману).

а — изменения УВБ, сейсмические события $K \geq 10$, показания деформометров, *б* — схема расположения деформометров

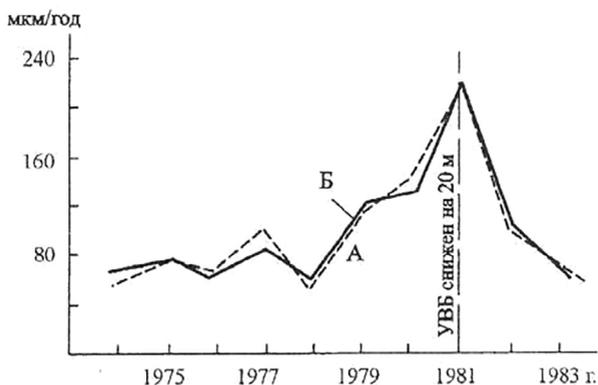


Рис. 34. Скорости смещения бортов правобережного разлома в створе плотины Ингури ГЭС за 1978–1983 гг. (по Балавадзе и Абашидзе)

измерениями в первые годы наполнения водохранилища отмечены смещения бортов ущелья навстречу друг другу и разнонаправленные сдвиги вдоль правобережного разлома. При этом блок Б имел вектор сдвига навстречу гидростатическому давлению, что свидетельствует о тектонической природе этого движения.

Активная реакция основания на техногенные нагрузки привела проектировщиков к выводу о нежелательности резких изменений уровня водохранилища. Однако рекомендации по этому вопросу много раз нарушались. Так, в 1986 г. произведена глубокая сработка водохранилища до отм. 395 м со средней скоростью 1 м/сут. Наполнение в этом же году происходило со скоростью 1,4–2 м/сут. Размах изменений УВБ достиг 104 м. Моменты экстремумов УВБ ознаменованы сильными региональными землетрясениями – Параванским 13 мая 1986 г. ($M = 5,7$, $K = 13,7$, $R = 160$ км, $h = 10$ км, $I = 8$ баллов) в период опорожнения водохранилища, а после наполнения 26 ноября 1986 г. зафиксирован толчок $K = 9,3$ с магнитудой $M = 4,1$ в 80 км юго-восточнее плотины. К этому же периоду быстрого подъема УВБ относится рост показаний пьезометров за цемзавесой с 10 до 40 % от действующего напора. О разуплотнении основания под напорной гранью

свидетельствовало также увеличение суммарного фильтрационного расхода до 1860 л/с, рост напора в пьезометре № 5 вблизи трещины № 616 до 65 % от полного. Параванское землетрясение было отмечено аномальным смещением репера 7 за плотиной на 7 мм.

В 1987 г. достигнут нормальный проектный уровень водохранилища НПУ на отм. 510 м и начался проектный режим эксплуатации ГЭС. Осадки и прогибы плотины при колебаниях УВБ носят квазиупругий характер с долей необратимой части до 20 %. В связи с большей податливостью правобережного массива место максимальной осадки переместилось на 4 горизонт на правом берегу с абсолютным значением около 16 мм. В плотине установился высокий уровень напряжений сжатия – более 14 МПа в консольном направлении на низовой грани, и около 13 МПа в арочном. По сравнению с 1986 г. региональная сейсмическая активность снизилась. На фоне стационарного режима эксплуатации стали более заметными аномалии в показаниях пьезометров и колебания фильтрационных расходов вне связи с УВБ. На графиках расходов и показаний пьезометров выделяются, например, период майских землетрясений 1988 г., апрельских и июльских сейсмических событий 1989 г. Из-за большой удаленности квалифицировать эти события как возбужденную сейсмичность нет достаточных оснований. Скорее всего, это проявления региональной сейсмичности, совпадающие по времени с изменениями УВБ. Целенаправленных исследований возбужденной сейсмичности на Ингурской ГЭС не проводилось.

Первая попытка связать аномалии в измерительных системах плотины с землетрясениями была сделана сотрудниками Гидро-спецпроекта (Мальшев, Ашихмин, Кабанов) после Рачинского землетрясения 15 июня 1991 г. ($M = 6,6$, $R = 120$ км, $h = 10$ км) по анализу параметров фильтрационного режима. Однако по результатам этой работы сделан вывод об отсутствии каких-либо закономерностей и корреляционных связей в изменениях фильтрационного режима до и после землетрясения. Между тем, при внимательном рассмотрении показаний пьезометров, с учетом

их расположения и влияния ближайших трещин, можно установить наличие отклика пьезометров на подготовительный период и последствия землетрясения 15 июня 1991 г. Так, на рисунке 35 видно, что в подготовительный период Рачинского землетрясения примерно за месяц до толчка пьезометрические уровни самого глубокого створа пьезометров № 13 снижались при росте напора на плотину, что можно объяснить увеличением сжимающих напряжений и закрытием трещин, питающих водоприемники пьезометров 1, 3, 4, 5 в данном случае – трещины № 615. После толчка и афтершоков в течение 30–40 суток пьезометрические уровни восстановились до нормальной зависимости от УВБ. Из графиков пьезометрических уровней следует также, что величина отклика прямо зависит от магнитуды землетрясения, а реакция пьезометров на изменение поля напряжений (величину раскрытия трещин) может служить надежным прогностическим признаком. Кроме того, по величине отклика можно судить о локализации зоны наибольших подвижек в результате землетрясений.

Так, пьезометры 1, 3, 5 у трещины № 615, пьезометры у трещины № 15а и на контакте скала–бетон, свидетельствуют о расположении вероятной поверхности сдвига при сейсме по простиранию трещины № 615. Об этом же свидетельствует анализ линий равного напора в основании за 1980–1991 гг., где трещина № 615 служит резкой границей раздела фильтрационных напоров.

На Ингурской ГЭС впервые в истории советской гидротехники были проведены обширные геофизические исследования [А. И. Савич, 1984, Савич и др., 2005], позволившие проследить изменения свойств основания в период эксплуатации высоконапорной плотины [Савич, 1990]. Установлена прямая связь скоростей сейсмических волн с УВБ, зависимость изменения этих скоростей от скорости наполнения и сработки водохранилища. Впервые установлена глубина влияния гидроузла на поле напряжений в основании, которая достигает для Ингурской плотины 500 м, описан механизм действия фильтрационного противодействия в основании на плотность пород при быстрых изменениях

УВБ. Под влиянием быстрых сбросов уровня избыточное трещинное давление в массиве основания приводит к прорастанию трещин, разуплотнению массива, снижению модуля деформации и прочности пород основания.

Геодезическими и наклономерными наблюдениями (Кузнецов, Абашидзе) установлено схождение бортов ущелья и подъемы массивов береговых примыканий при наполнении водохранилища. Телеметрические измерения показали, что нижняя часть плотины слабо реагировала на увеличение гидростатического напора, а в средней и верхней части плотины арочные и консольные напряжения существенно, в 1,5–1,8 раза, превысили расчетные с максимумом на низовой грани. Геодинамическое влияние на НДС плотины специально не изучалось, но можно предположить, что увеличение арочного сжатия в плотине есть следствие этого влияния. К сожалению, намеченная программа геофизических исследований в створе Ингури ГЭС не была полностью выполнена.

3.8. Плотина Нурекской ГЭС

Несмотря на то что в настоящей работе рассматриваются в основном бетонные плотины, исключение сделано для каменно-набросной плотины Нурекской ГЭС на р. Вахш в Таджикистане, где проведены подробные и широкомасштабные советско-американские исследования возбужденной сейсмичности в районе глубоководного водохранилища [Мирзоев и др., 1987].

Плотина Нурекской ГЭС высотой 300 м, длиной по гребню 704 м, шириной по основанию 1500 м с объемом уложенного грунта 12,7 млн м³ создает водохранилище объемом 10,5 км³, длиной 70 км с призмой сработки высотой 53 м. Створ ГЭС расположен в северной части Таджикской депрессии, в среднем течении р. Вахш, у подножья Гиссарского хребта, где простирается Гиссаро-Кокшальский разлом, определяющий сейсмический режим всего Таджикистана. Ближе к водохранилищу проходит Илякско-Вахшский разлом, контролирующий развитие Таджикской

депрессии. Водоохранилище оконтуривают наиболее близкие Гулизинданский, Сарикамарский и Ионахский разломы и оперяющие разломы меньшего порядка. Максимально возможные землетрясения оцениваются магнитудой не более чем $M = 6,5$. В основании плотины залегают наклонные в сторону верхнего бьефа переслаивающиеся песчаники и алевролиты.

Район створа Нурекской ГЭС с расчетной интенсивностью землетрясений 9 баллов представляет собой идеальный полигон для изучения возбужденной сейсмичности, поскольку систематические инструментальные сейсмические наблюдения здесь начаты Таджикским институтом сейсмостойкого строительства и сейсмологии (ТИССС) с 1955 г. с уровня $K = 7$ за 15 лет до начала строительства гидроэлектростанции. Наполнение водохранилища начато в 1972 г., а подробные исследования возбужденной сейсмичности — в 1975 г. с установкой сети американских высокочувствительных сейсмостанций с телеметрической передачей информации.

В результате исследований установлено, что после заполнения водохранилища ежегодный уровень сейсмичности в его зоне повысился более чем в 4 раза, в среднем от 50 землетрясений в год в период 1955–1970 гг. до 400 землетрясений в год в 1971–1979 гг. По мере повышения УВБ эпицентры возбужденных землетрясений мигрировали вдоль водохранилища от плотины в его хвостовую часть. Изменения сейсмичности связаны со скоростью изменения УВБ (рис. 36). Чаще всего сейсмичность возникала при уменьшении скорости наполнения водохранилища. Изменения соотношения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн V_p/V_s свидетельствуют об изменениях свойств геологической среды при заполнении водохранилища. Основными признаками возбужденной сейсмичности является повышенная плотность очагов землетрясений в зоне водохранилища и вблизи от него, которая коррелирует с изменениями УВБ, большое число афтершоков, преимущественное расположение гипоцентров на глубине 0–5 км. Исследователи пришли к выводу, что с заполнением водохранилища не следует ожидать увеличения параметров мак-

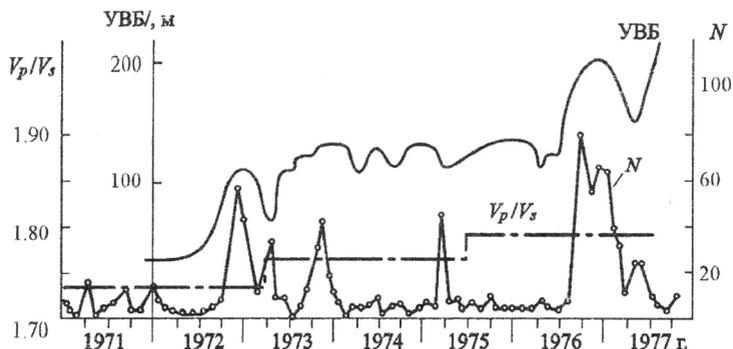


Рис. 36. Возбужденная сейсмичность и изменение скоростей сейсмических волн в районе створа Нурекской ГЭС в первые годы наполнения водохранилища

симально возможных землетрясений. Это возможно только в случае водонасыщения крупных разломов на большом протяжении.

Наблюдения в районе Нурекского водохранилища показали наличие трех характерных периодов в создании и эксплуатации глубоководных водохранилищ. Первый период — это первое наполнение водохранилища, когда возникает большое число слабых близких землетрясений с малой глубиной очагов (1–5 км). Это явление характерно не только для сейсмичных регионов. Пример — землетрясения при заполнении Братского водохранилища [Суханов и др., 1978]. Второй период — завершение наполнения до проектного уровня, глубокое водонасыщение пород, повышение порового давления и изменение напряженного состояния вмещающей геологической среды. Быстрое изменение УВВ в этот период приводит к увеличению региональной сейсмичности с возбужденными землетрясениями повышенной энергии. Третий период — полное насыщение водой всего приводохранилищного объема пород на большую глубину через разломы и тектонические нарушения с их сейсмической активизацией, с изменением НДС пород, их динамических характеристик, скоростей сейсмических волн. Этот период имеет большую продолжительность (сотни лет), а потому мало изучен. Авторы исследований

[Мирзоев и др., 1987] считают, что крупные водохранилища не повышают расчетной сейсмичности региона, а скорее наоборот, избавляют его от «жестких» сейсмических ударов. Существует, однако, мнение [Левкович, 1985], что возбужденные землетрясения со временем увеличивают глубину гипоцентров и могут разбудить дальние очаги большой мощности.

Общие выводы из ретроспективного анализа по перечисленным объектам в основном сводятся к следующему:

1. Как и ожидалось, высокие бетонные плотины, особенно плотины статически неопределимых систем (арочные, распорные, гравитационные в узких створах), подвержены геодинамическим влияниям. Это влияние тем заметнее, чем ближе расположена плотина к активному разлому, чем выше собственные напряжения пород, сейсмичность и тектоническая активность района створа и чем больше размах колебаний уровня водохранилища. Последствия этих влияний проявляются со временем в изменениях проектного НДС, признаках старения сооружения и снижения несущей способности всей системы плотина—основание.

2. Геодинамическое влияние проявляется при деформациях створа после наполнения водохранилища в увеличении сжимающих напряжений вдоль створа из-за разгрузки горизонтальных тектонических напряжений, в возникновении возбужденной сейсмичности, в сейсмогенных флуктуациях измеряемых параметров, не зависящих от УВБ, в появлении потенциально неустойчивых массивов на откосах и обрушениях береговых массивов, дифференцированной работе береговых примыканий, изменениях фильтрационного противодействия и химического состава дренажных вод.

3. Из традиционных действующих средств измерения на плотинах наиболее чувствительными к геодинамическим воздействиям являются фильтрационные расходы, сети дренажных скважин и пьезометров в зонах тектонических нарушений и крупных тре-

щин, прямые и обратные отвесы, гидростатические нивелиры, длиннобазовые струнные скальные деформометры на контактах скала–бетон, щелемеры в деформационных швах, арматурные динамометры. В основании плотин геодинамические смещения проявляются по ближайшим разломам и тектоническим трещинам.

4. Регламенты действовавших нормативных документов по натурным наблюдениям и исследованиям (СНиП П-54-77, П10-83 ВНИИГ, П16-84 ВНИИГ и др.), рассчитанные на контроль статической работы плотин, позволяли составить лишь качественные суждения по рассмотренным материалам. Исследования геодинамических воздействий с помощью действующих измерительных систем требуют непрерывного мониторинга, автоматизации средств измерения или более частого опроса приборов, особенно в периоды сейсмической активности. При анализе НДС плотин необходимо учитывать геодинамические нагрузки.

5. Наиболее важное качество измерительных систем плотин заключается в их способности реагировать на изменения поля напряжений в подготовительный период землетрясений, что открывает новые перспективы в прогностических исследованиях. В сочетании с наличием контролируемой возбужденной сейсмичности, достигнутыми успехами сейсмологии в изучении предвестников, геологической и сейсмотектонической изученностью района – это позволяет расширить экспериментальные возможности в исследовании механизма возбужденной сейсмичности и прогноза землетрясений. При этом надежность результатов повышается за счет комплексирования при анализе разного вида предвестников: гидродинамических, деформационных, температурных, геохимических, сейсмологических и других, обусловленного метрологическими возможностями многофункциональных измерительных систем плотин с учетом их модернизации и автоматизации.

Указанные возможности могут быть расширены применением геофизических методов и устройством в районах гидроузлов

специализированных геодинамических полигонов, а также использованием наблюдений на соседних по каскаду плотинах и ближайших сейсмических станциях.

Ретроспективный анализ материалов натуральных наблюдений на плотинах Бухтарминской, Братской, Красноярской ГЭС не выявил прямых доказательств геодинамического влияния на НДС этих сооружений, хотя и на этих объектах фиксировались случаи нарушения зависимостей параметров фильтрационного режима от УВБ. Плотина Красноярской ГЭС впервые испытала сейсмическую нагрузку 27 октября 2000 г., Бухтарминская ГЭС – при Алтайском землетрясении 27 сентября 2003 г. Никаких негативных последствий при этом для сооружений не наблюдалось. Ахурянская гравитационная плотина высотой 57 м, длиной по гребню 210 м перенесла Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. На расстоянии 24 км от эпицентра она испытала сотрясения интенсивностью до 9 баллов без видимых трещин и дефектов. Всего в плейстосейстовой области Спитакского землетрясения оказалось 15 средненапорных гидроузлов с различными типами плотин. Специальной комиссией Минэнерго СССР установлено отсутствие ущербов на гидротехнических сооружениях, кроме мелких трещин в углах некоторых зданий ГЭС. Это свидетельствует о высокой сейсмостойкости плотин.

3.9. Результаты наблюдений на некоторых зарубежных плотинах по материалам ICOLD

На основании опыта работы в комитетах ICOLD можно утверждать, что за рубежом измерительные системы плотин не привлекались к специальным исследованиям геодинамического влияния, дело ограничивалось сейсмометрическим контролем и обследованием плотин после сильных землетрясений. Тем не менее некоторые штатные виды натуральных наблюдений объективно включают в себя геодинамические влияния, а потому представляют интерес для рассматриваемой проблемы. К ним

относятся наблюдения за осадками, деформациями створа, смещениями береговых примыканий, влиянием разломов и трещин в основании, режимом фильтрации, движением оползней, обрушениями.

На V конгрессе ICOLD в Париже в 1955 г. были представлены доклады А. Прейсмана и Б. Гильга (Швейцария), Бланше и Невьера (Франция) о деформациях берегов водохранилищ арочных плотин Мовуазен, Бор и Тинь. Зафиксировано схождение берегов с максимумом 22,5 мм на длине створа 650 м в головной части водохранилища и максимальные деформации сжатия в нижней трети по высоте плотин. Смещение бортов створов объяснялось разбуханием пород (гнейсов и кварцитов), упругими деформациями и не связывалось с собственными напряжениями в береговых массивах горных пород и с сейсмическими событиями.

Большее внимание сейсмостойкости плотин было уделено на XIII конгрессе ICOLD в Нью-Дели (Индия) в 1979 г. В генеральном докладе Р. Лейна (Великобритания) констатировалось, что сейсмическая активность связана не только с системой разломов, но и с высоким уровнем напряжений во вмещающей геологической среде, что свидетельствовало о более широком, геодинамическом понимании проблемы. Однако термин «геодинамическое влияние» еще не употреблялся. В докладе А. Свенсона и Р. Шармы описывается отклик арочной плотины Пакойма высотой 113 м и длиной по гребню 180 м на землетрясение Сан-Фернандо в 1971 г. с магнитудой $M = 6,6$. При ускорениях до 0,8 g и расположении эпицентра на расстоянии 6,4 км от плотины расстояние между устоями плотины на берегах сократилось на 24 мм, правый борт опустился относительно левого на 17 мм. Из-за поворота оси плотины раскрылся вертикальный радиальный шов между аркой и левым устоем от 6 до 10 мм от гребня плотины вниз на 14 м. Плотина сохранила работоспособность, раскрывшийся шов зацементирован. К сожалению, никаких данных о наблюдениях на плотине в подготовительный период этого землетрясения не приводится.

Есть данные, что при подготовке землетрясения Вранча в Румынии 4 марта 1977 г. с магнитудой $M = 7,2$ фильтрация в основании гравитационной плотины Изворул-Мунтелуй высотой 127 м возросла с 50 л/мин (02.03.1977) до 105 л/мин (05.03.1977), а в последующие дни после землетрясения снизилась до 75 л/мин. Плотина не пострадала, дополнительные напряжения в верхней части плотины оценены по расчету в 1,5 МПа, приращение смещения центральной секции плотины в верхний бьеф составило 0,2 мм, повреждений не было.

Наиболее интересные и квалифицированные наблюдения были проведены на плотине Куробе в Японии в период 1965–1985 гг.

Купольная арочная плотина высотой 186 м, длиной по гребню 500 м и объемом бетона 1,6 млн m^3 построена в 1963 г. Водохранилище наполнялось с 1960 по 1969 г. С учетом уроков аварии плотины Мальпассе во Франции интенсивные инструментальные наблюдения проводились в массивах горных пород береговых примыканий в течение 20-летнего периода. В береговых штольнях на трех уровнях были установлены длиннобазовые скальные деформометры, прямые и обратные отвесы, гидростатические нивелиры. По берегам установлены геодезические знаки для светодальномерных измерений расстояний между берегами долины в четырех створах. Наблюдения велись в период с 1965 по 1985 г. самым тщательным образом с учетом температурных поправок. По показаниям обратных отвесов было установлено, что флуктуации смещений между берегами в 4 раза больше, чем в направлении течения – 10 мм против 2,5 мм с максимумом в верхней трети плотины. Сужение долины со стороны верхнего бьефа наблюдалось летом, а расширение – зимой. Остаточная деформация была также больше между берегами и направлена в сторону сужения долины. Устойчивый тренд к сужению долины обнаружен только в одном из створов выше гребня плотины со стороны нижнего бьефа. Остальные створы с учетом температурных поправок сохраняли стабильную длину. Заметим, что эти наблюдения начаты спустя семь лет после наполнения водохранилища, когда основные деформации створа были уже заверше-

ны. Кроме того, представляется, что значительную компенсирующую роль в характере деформаций створа играет оригинальная конструкция плотины с ныряющими открылками-устоями, подобная пружине. К сожалению, в докладе Н. Кондо и Т. Иванаги [Kondoh, Iwanaga, 1988] нет данных по напряжениям в плотине. Нет также данных об отклике измерительных систем плотины на сейсмические события.

Рано утром 17 января 1995 г. на японском о. Авайи в префектуре Хйого произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой $M = 7,2$. В городе Кобе и его окрестностях были разрушены многие жилые и общественные здания, дороги, эстакады, мосты, прервано электро-, водо-, газоснабжение и телефонная связь. Погибли 6 310 человек, пострадали 43 188 человек, возникло 285 пожаров. На расстоянии 250 км по радиусу от эпицентра в зоне влияния землетрясения оказалось более 250 плотин, в том числе 157 гравитационных, 35 земляных, 24 каменнонабросных, 20 арочных и арочно-гравитационных, 5 облегченно-гравитационных и контрфорсных. Все они немедленно после землетрясения были обследованы специалистами для оценки повреждений и степени безопасности. В целом инспекция не установила нарушений, которые могли бы повлиять на безопасность обследованных плотин. Вместе с тем в докладе были подробно описаны повреждения плотин, ближайших к эпицентру.

Тенно — бетонная гравитационная плотина высотой 33,8 м, построена в 1981 г. Расположена в 16 км от эпицентра. Во время землетрясения обрушился небольшой участок скалы на правом берегу, что не причинило ущерба плотине. Приток в водохранилище был очень мал по сравнению с его емкостью. В продолжение двух сухих сезонов уровень водохранилища снижался по 2 см в сутки, благодаря фильтрации. После землетрясения скорость снижения уровня увеличилась до 10 см в сутки, но впоследствии стабилизировалось на прежнем уровне, что позволило судить об отсутствии угрозы увеличения фильтрационных потерь.

Дондо — бетонная гравитационная плотина высотой 71,5 м, построена в 1989 г. Расположена на расстоянии 19 км от эпицентра.

Рекогносцировкой не выявлено каких-либо аномалий и нарушений в районе створа. Были обнаружены флуктуации порового давления, но непрерывные наблюдения показали его постепенную стабилизацию.

Гохонматцу — одна из первых плотин из укатанного бетона высотой 33,3 м, расположена в 19 км от эпицентра. Имеются вывалы скалы с откоса водосливного канала и левого берега, что не представляет ущерба для надежности плотины. Обнаружены трещины в бетонном покрытии гребня и в парапетах на гребне. В теле плотины трещин не обнаружено.

Хитокуро — бетонная гравитационная плотина высотой 75 м, построенная в 1984 г. Плотина расположена на расстоянии 47 км от эпицентра. Пик ускорения, записанный в ее нижней галерее — 0,2 g, оказался самым большим из записанных на всех других плотинах региона. Землетрясение не причинило вреда плотине, если не считать обрушений скальных фрагментов на естественных откосах водохранилища на некотором расстоянии от плотины, что не повлияло на ее надежность.

Таким образом, при катастрофическом землетрясении Кобе, вызвавшем огромный объем разрушений в городе, многочисленные плотины региона почти не пострадали и полностью сохранили свою работоспособность.

С 26 по 31 июля 2003 г. в северной части префектуры Мияги в северной Японии произошло более 200 толчков, среди которых сильнейший имел магнитуду 6,2, ускорение 0,2 g. Было разрушено 318, повреждено 1617 домов, ранено 600 человек. Сразу после землетрясений было обследовано 53 плотины, ближайших к эпицентру. Максимальное ускорение было записано акселерограммой на каменно-набросной плотине **Кийонума** 179 см/сек² в основании и 319 см/сек² на гребне. Ни на одной из 53 плотин повреждений не обнаружено.

Представляют интерес примеры воздействия на плотины сильных землетрясений последних лет на Тайване в 1999 г. и в Турции в 2000 г.

Главное событие землетрясения Чи-Чи произошло 21 сентября 1999 г. с магнитудой $M = 7,6$, глубиной гипоцентра 7 км с эпицентром близ г. Чи-Чи, в 160 км южнее Тайбэя. Несколько афтершоков имели магнитуду $M = 6,8$. Механизм землетрясения приурочен к разлому Челонгфу. Разрыв имел длину 105 км с вертикальным смещением от 2-х до 3-х м, с подъемом в некоторых местах до 10 м. Пиковое ускорение у разлома достигало 1,0 g. Более 2200 человек погибло и 8000 были ранены. Повреждены тысячи зданий, электроподстанции, линии электропередачи и плотины.

Плотина **Ши-Канг** подверглась наибольшим повреждениям. Эта пятая плотина каскада в нижнем течении р. Тача представляет собой сооружение высотой 25 м из укатанного бетона с водохранилищем объемом 2,7 млн м³, 18 водосливными пролетами, двумя камерами для промыва наносов и мостом поверху. В нижнем бьефе расположен водобой с гасителями энергии. Главный разрыв разлома Челонгфу проходит в 300 м севернее плотины, а один из оперяющих разрывов оказался прямо под подошвой плотины, отчленив три правобережных пролета. Другой борт разлома разрезает тоннель в левобережном примыкании плотины. В период строительства в 1970 г. этот разлом в основании плотины не был обнаружен. Взброшенное крыло разлома поднялось на 9,8 м, а опущенное тоже поднялось, но только на 2,1 м. Результирующая разница смещений в 7,7 м разорвала секции плотины. Кроме того, все левое крыло плотины и ее основание были сдвинуты поперек долины на 6 м и в нижний бьеф на 2 м. Ускорение, измеренное в ближайшем городе, достигало 0,56 g. Другие секции над линией разрыва получили в основном небольшие трещины и смещения вдоль конструктивных швов. Диагональные трещины в пределах одной секции были единичными, и лишь одна пересекала две смежные секции. Во время землетрясения 7 из 18 затворов на водосливе оставались работоспособными. Кроме затворов трех поврежденных секций, все остальные были отремонтированы в короткий срок. На мосту,

который испытал деформации кручения, разошлись швы парапетов до 150 мм. Уплотняющие шпонки в швах между секциями были разорваны в нескольких местах, что вызвало протечки из водохранилища и подъем уровня реки в нижнем бьефе на 1 м. Основные ремонтные работы были выполнены за 2 месяца (кроме тоннеля), а законсервированные смещения секций плотины как последствия разрушительного землетрясения использовались для привлечения туристов.

Грунтовая плотина **Лиятян** высотой 40 м с широким центральным ядром, каменно-набросной низовой и гравийной верховой призмами закончена строительством в 1992 г. К моменту землетрясения УВБ был на 31 м ниже НПУ. Основными последствиями землетрясения были осадки откосов на 50–70 мм и гребня на 96 мм. Смещение в нижний бьеф достигло 60 мм. Наблюдались открытия и закрытия швов на парапете гребня. Наиболее крупная трещина пересекла дорогу у левого примыкания гребня. Несколько пьезометров показали рост уровня на 1–4 м, фильтрация увеличилась на 20 %, а в нижней галерее с 8 до 30 л/мин, но через неделю стабилизировалась до обычного уровня. Визуальный осмотр бетонного водослива на левом берегу и моста через водослив показал отсутствие повреждений. В целом 8 обследованных плотин различных типов в эпицентральной области, получившие повреждения в виде различных трещин, не потеряли работоспособность и были быстро отремонтированы.

Аналогичная ситуация отмечена и в Турции, где влияние катастрофического землетрясения 1999 г. с магнитудой $M = 7,4$ в 7 км южнее г. Измит испытали 48 плотин. Ближайшая к разрыву плотина **Ювазик** из гравелистых материалов с глиняным экраном высотой 108 м при напоре 93 м получила вертикальную осадку 100 мм и горизонтальное смещение гребня на 30 мм, не потеряв работоспособность. Каменнонабросная плотина **Гокзе** высотой 50 м, расположенная в 55 км от эпицентра, поврежденной не получила. В эпицентральной зоне оказались около 20 различных плотин. Следует заметить, что во всех случаях силь-

ных сейсмических воздействий на плотины их водохранилища не были заполнены до НПУ.

В июне 1990 г. в Каспийском регионе Ирана произошло разрушительное Манджилрудбарское землетрясение с магнитудой $M = 7,7$. Был разрушен город Манджил и повреждена плотина **Сефидруд** массивно-контрфорсного типа. Высота плотины 106 м, длина по гребню 417 м, включающая 24 контрфорса шириной по 14 м и два массивных береговых устоя. Водоохранилище имеет объем $1,8 \text{ км}^3$. Створ сложен на правом берегу прочными андезитами, а на левом – андезитовыми брекчиями и пироклазами. Поэтому можно предположить, что в русле реки имеет место разрывное нарушение по литологической границе пород. Повреждения выражены нарушениями горизонтальных и вертикальных строительных швов преимущественно на перекрытиях низовой грани и в центральных контрфорсах, где отмечены трещины и выкрашивание кромок швов до 10 см. Плотина осталась в работоспособном состоянии.

Сильное землетрясение в юго-восточном Иране 28 декабря 2003 г. $M = 6,3-6,5$ интенсивностью до 10 баллов произошло около г. Бам вдоль одноименного четвертичного разлома. Плотина **Жирофт**, расположенная в 60 км от эпицентра с водохранилищем объемом 200 млн м^3 практически не пострадала. Возможно, была нарушена цементационная завеса в основании, т. к. фильтрационный расход увеличился с 27 до 29,5 л/мин, но через несколько часов вернулся к начальной величине. Эта же плотина подверглась повторному испытанию 1 марта 2005 г., когда в Иране, в провинции Керман, в 60 км к СВ от города Керман произошло сильное землетрясение с магнитудой 6,4 и 11 афтершоками. Всего в провинции расположены 4 плотины: **Жирофт**, **Сириан**, **Шахид**, **Ялех** и **Шамсабад** на расстояниях, соответственно, 243, 152, 106 и 172 км от эпицентра в зоне разлома Кахбанан. По сообщению члена комитета по сейсмике ICOLD А. Махдавиана, указанные плотины после землетрясений не имели повреждений.

Землетрясение 26 декабря 2004 г. в Индийском океане с разрушительным цунами, по сообщению М. Виланда (ICOLD), не причинили вреда плотинам Индонезии и Таиланда.

Особое внимание ICOLD уделяет явлению возбужденной сейсмичности (ВС), поскольку в этом есть ее профессиональный интерес. Впервые возбужденные землетрясения отмечены на водохранилище Мид после строительства в 1935 г. гидроэлектростанции **Гувер** на р. Колорадо с арочной плотиной высотой 220 м. Систематические наблюдения за этим феноменом и сбор данных начались после 1960 г. Специальные исследования позволили к 1970 г. сформулировать отличительные признаки возбужденной (наведенной) сейсмичности.

Арочная плотина **Вайонт** (Италия) высотой 262 м с объемом водохранилища 170 млн м³ ощутила первые толчки возбужденной сейсмичности в 1962 г. Подъем воды еще на 50 м вызвал более сильную серию толчков (рис. 37). В 1963 г. уровень водохранилища понизился, толчки прекратились. В августе 1963 г. при УВБ 200 м произошла новая серия землетрясений, а 9 октября 1968 г. разразилась катастрофа — в водохранилище обрушился откос горы Ток объемом около 300 млн м³, перекрывший ущелье. Всплеск и перелив волны через плотину уничтожил поселки в нижнем бьефе с большим количеством жертв. Плотина, введенная в узком ущелье, это воздействие выдержала.

Фундаментальной является связь возбужденной сейсмичности с наполнением водохранилища. Сейсмический потенциал разлома-генератора, источника ВС, готовится задолго до триггерного события, но его разрядка наступает только под влиянием «агентов триггера», например водонасыщения под большим напором, быстрого изменения уровня водохранилища, которые в свою очередь влияют на величину энергии этой разрядки. В этой взаимосвязи трудно определить главное звено. К параметрам возбуждения относятся вес воды в водохранилище, эффект порового (трещинного) давления, возможный фазовый переход воды при определенных конвективных и РТ-условиях в зоне очага, близкие взрывы или удаленные землетрясения большой

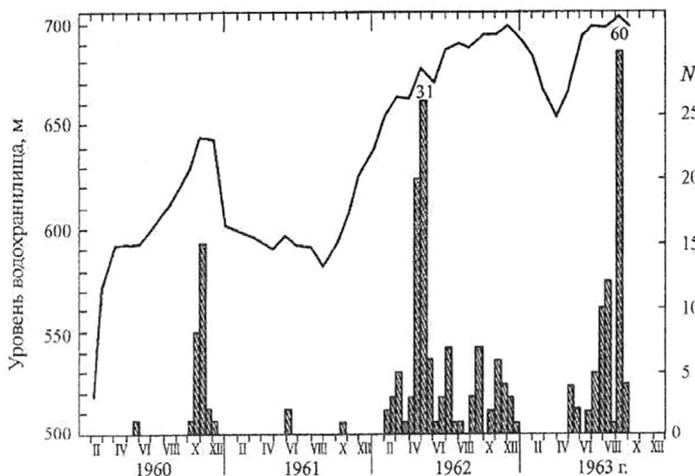


Рис. 37. Уровни водохранилища Вайонт (Италия) и частота землетрясений (по данным ICOLD)

мощности. Вес воды действует немедленно после приложения. Чем быстрее наполняется водохранилище, тем выше вероятность триггерного эффекта. А для порового давления и фазового перехода требуется время, иногда годы, чтобы эффект проявился. В числе возбуждающих причин отмечается также рост кластеров вокруг водохранилища, концентрация промышленных взрывов и акустическая эмиссия, свидетельствующие о поверхностной активизации. В большинстве случаев ВС проявляется сразу после начала наполнения водохранилища до напоров около 100 м и заканчивается после уменьшения напора.

Характерными признаками возбужденных землетрясений являются:

- прямая зависимость количества землетрясений от скорости изменения уровня водохранилища и высоты призмы сработки;
- приуроченность наиболее сильных землетрясений к экстремальным уровням водохранилища – ФПУ и ГМО;
- обязательное наличие форшоков и большое количество слабозатухающих афтершоков после главного толчка;

– малые глубины гипоцентров 1–10 км, преимущественно 3–7 км;

– плотная группировка эпицентров ВС вблизи от плотины, чаще в наиболее глубокой части водохранилища или затопленного разлома;

– характерная миграция эпицентров – расхождение по краям водохранилища при его наполнении и схождение к плотине при сработке;

– высокое соотношение между магнитудой наибольшего афтершока и главного толчка, порядка 0,9, что контрастирует с обычными землетрясениями. Вероятность возникновения ВС тем выше, чем сложнее построено горное сооружение, чем крепче породы и выше собственные тектонические напряжения, чем активнее проявления унаследованных движений.

К 2000 г. список гидроузлов мира с наблюдаемой ВС насчитывает 39 объектов, а с учетом трех объектов России их будет 42 (табл. 10). По мнению ICOLD, с учетом несистематизированных наблюдений таких объектов может быть около 100, что составляет около 10 % от самых высоких плотин мира. Максимальная наблюденная магнитуда сотрясений ВС имела значение 6,3 (**Койна**, **Кремаста**). Наиболее значимые случаи повреждений от ВС наблюдались на плотинах **Хсинфенкан** в Китае, **Мратинье** в Югославии и **Похос** в Перу.

Контрфорсная плотина **Хсинфенкан** высотой 105 м в провинции Квантун, в КНР, построена на трещиноватых гранитах. Водоохранилище объемом 11,5 км³ наполнялось с 1959 г. До постройки ГЭС сейсмическая активность района была низкой и проект не предусматривал специальных мероприятий по обеспечению сейсмостойкости. Слабые толчки возникли сразу с началом накопления воды в водохранилище, а в 1962 г. зарегистрировано землетрясение $M = 6,1$ вблизи от водохранилища с гипоцентром на глубине 3–6 км. В дальнейшем толчки продолжались с магнитудой до 5,3 (рис. 38) и группировкой эпицентров в районе створа. Плотина получила повреждения – трещины длиной 80 м у гребня и в контрфорсах, что потребовало ремонта. Максималь-

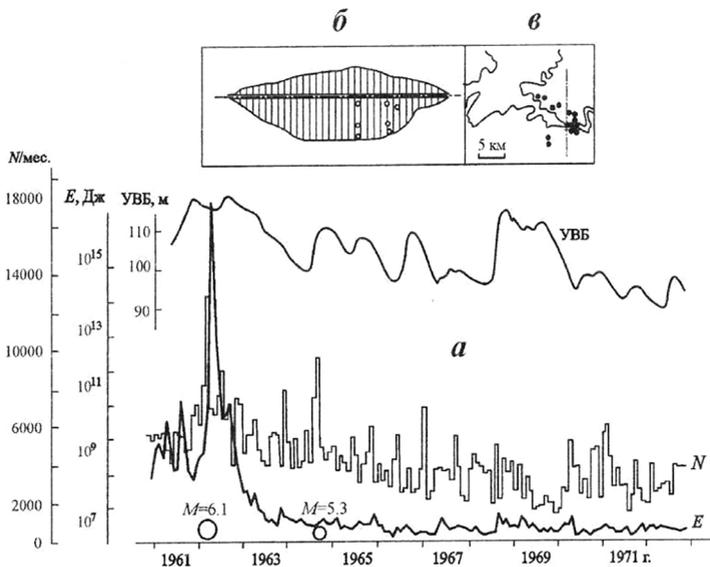


Рис. 38. Контрфорсная плотина Хсинфенкан (КНР):
а — изменения УВБ, месячная частота землетрясений и выделенная сейсмическая энергия; *б* — план плотины с расположением датчиков сильных движений; *в* — кластерные зоны возбужденных землетрясений (по материалам ICOLD)

ные амплитуды и напряжения зафиксированы в верхней части плотины.

Плотина **Мратинье** — тонкая арка высотой 220 м в узком и глубоком каньоне на р. Пива на прочных триасовых известняках. Главными проблемами гидроузла являются карсты и региональный разлом в правобережном примыкании на расстоянии 1 км от плотины. Изучение сейсмичности на стадии проекта оценено возможностью ускорения 0,25 g. До наполнения водохранилища в створе были установлены сейсмографы и развернута региональная сеть сейсмических наблюдений. Отмечены сотни событий в год с магнитудами $M = 1-3$. В первое полугодие с начала наполнения водохранилища отмечен рост числа событий и увеличение магнитуд. В 1976 г. водохранилище было наполнено на 80 %,

а в 1977 г. закончены строительные работы. Число сейсмических событий возросло до 273 в год, а после наполнения водохранилища до НПУ в 1978 г. их число увеличилось до 475, а магнитуды до 4,1. В последующие годы происходило снижение сейсмической активности до 122 событий в 1981 г. при максимальной магнитуде до 3,1. Кульминационные годы по выделению сейсмической энергии представлены на рисунке 39. Датчики сильных движений в центральной секции записали ускорения и их распределение по высоте плотины при магнитуде $M = 4,1$.

Плотина **Поехос** на р. Чира расположена на севере Перу в предгорном районе Анд, вблизи от тихоокеанского берегового разлома, в зоне субдукции континентальных плит. Плотина высотой 50 м и длиной по гребню 10 км из скальных и гравелистых грунтов с центральным глиняным ядром образует водохранилище объемом 1 км³. Район отличается высокой сейсмической активностью с ускорениями до 0,4 g, в течение более чем 25-летнего срока эксплуатации значимых землетрясений записано не было. Последствиями слабых толчков было увеличение осадки гребня, которое устранялось досыпкой и планировкой.

Список плотин с проявлениями возбужденной сейсмичности, которая специально изучалась сейсмологами, представлена в таблице 10, составленной комитетом ICOLD и дополненной нами объектами России и СНГ.

Таблица 10

Возбужденная сейсмичность в районах створов крупных гидроузлов

Водоохранилище (страна)	Страна	Глубина водохранилища, м	Объем водохранилища, км ³	Возбужденная сейсмичность, баллы/М	Примечания
Акосомбо	Гана	109	148	5 баллов	1
Алмендра	Испания	185	2,65	$M = 3,2$	1
Асуан	Египет	90	160	$M = 5,2$	3
Бенмор	Новая Зеландия	96	2,04	$M = 5$	3

Продолжение табл. 10

Водохранилище (страна)	Страна	Глубина водохранилища, м	Объем водохранилища, км ³	Возбужденная сейсмичность, баллы/М	Примечания
Блоуеринг/Тайбинго	Австралия	142	2,56	М = 3,5	3
Камариллас	Испания	43	0,037	М = 4,1	3
Канеллас	Испания	132	0,68	4,7	1
Капивара	Бразилия	60	10,5	4,4	1
Кенайхо	Испания	97	0,47	4,2	4
Данянанку	Китай	97	16	4,7	4
Эль-Градо	Испания	85	0,40	5 баллов	1
Экумбене	Австралия	106	4,76	М = 5	3
Фурнас	Бразилия	111	22,95	5 баллов	1
Грандваль	Франция	78	0,29	5 баллов	1
Гувер	США	191	36,7	М = 5	3
Июкаси	США	107	1,43	3,8	
Кариба	Замбия	122	160,4	6,25	2
Кастраки	Греция	91	0,10	4,6	2
Хоа-Лим	Тайланд	80	7,0	4,5	2
Койна	Индия	100	2,8	6,3	3
Кремаста	Греция	120	4,75	6,3	3,5
Куробе	Япония	180	0,20	4,9	1
Маникуаган-3	Канада	96	10,42	4,1	2
Марафон	Греция	60	0,04	5,75	4
Монтейнар	Франция	125	0,275	7 баллов	4
Моссирок	США	124	1,96	М = 4,3	4
Нурек	Таджикистан	285	11,0	4,5	3
Оровилл	США	204	4,4	5,7	2 или 3
Парабуна-Параитинга	Бразилия	102	4,74	3,2	4
Пиастра	Италия	84	0,013	4 балла	4

Водохранилище (страна)	Страна	Глубина водохранилища, м	Объем водохранилища, км ³	Возбужденная сейсмичность, баллы/М	Примечания
Пьяве ди Кадора	Италия	98	0,07	4 балла	
Порто Колумбия	Бразилия	50	3,76	М = 5,1	4
Пуаки	Новая Зеландия	108	10,50	4,6	4
Шенво	Китай	75	0,79	4,8	4
Свифт	США	116	0,93	5,0	4
Сринагаринд	Тайланд	133	17,7	5,9	3
Вуглан	Франция	112	0,605	4,4	4
Хсинфенкан	Китай	105	13,9	6,0	4
Зелин	Китай	62	7,17	3,2	4
Чиркейское	Россия	205	2,7	4,0	3
Зейское	Россия	98,3	68,4	3 балла	2
Саяно-Шушенское	Россия	220	31,34	3 балла	3
Чарвакское	Узбекистан	148	2,0	М = 4	3
Токтогульское	Кыргызстан	180	19,5	М = 5	3
Бурейское	Россия	110	20,9	М = 4	3

Примечания: 1 – не местное землетрясение, 2 – землетрясение до наполнения водохранилища, 3 – после наполнения, 4 – гипоцентр глубже 20 км.

3.10. Некоторые общие выводы

Из опыта наблюдений за перенесенными возбужденными землетрясениями на зарубежных и отечественных плотинах следует несколько выводов, определяющих это явление и отношение к нему.

1. Плотины, практически всех типов в плейстоценовых областях, как правило, остаются работоспособными, не теряют своих основных эксплуатационных качеств. В то же время в этих областях возможны случаи катастрофических разрушений других

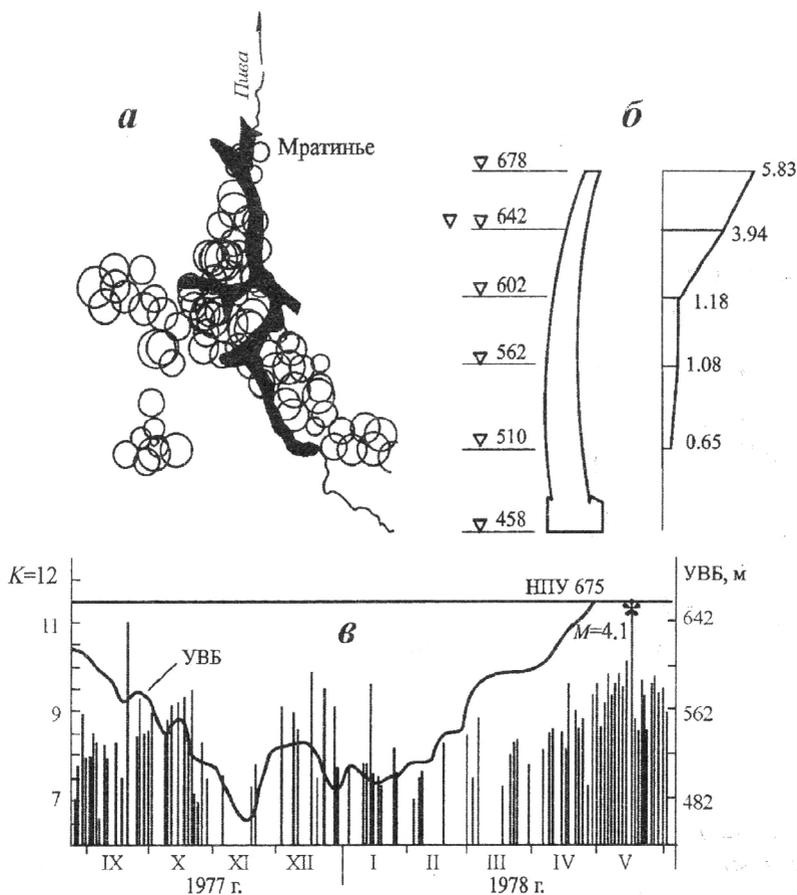


Рис. 39. Арочная плотина Мратинье (Югославия):
a – карта эпицентров в районе водохранилища в пиковый период возбужденной сейсмичности, *б* – ускорения в % по высоте ключевой секции плотины, *в* – выделение сейсмической энергии (К) в зависимости от изменений УВБ (по материалам ICOLD)

объектов и даже целых городов с большим числом человеческих жертв (Вайонт, Хсинфенкан, Кобе, Чи-Чи, Койна), что требует серьезного отношения к возбужденной сейсмичности, в том числе к ее прогнозированию из соображений не столько технической, сколько социальной безопасности.

2. Многофункциональные измерительные системы плотин в совокупности с сейсмометрическими и региональными сейсмологическими наблюдениями предоставляют широкие возможности экспериментального изучения феномена возбужденной сейсмичности, ее влияния на состояние плотин, разработки методов ее учета при проектировании. ВС может рассматриваться как модель для отработки метода краткосрочного прогноза землетрясений с учетом богатой статистики событий.

3. Система антисейсмического контроля плотин, организованная на современном уровне автоматизации при наличии ВС является самообучающейся в отношении прогностических задач благодаря регулируемой нагрузке на земную кору, хорошей изученности геологии и сейсмотектонических условий региона, большому количеству сейсмособытий, известным периодам активизации, длительным временным рядам наблюдений, стандартизированным средствам измерения. В этом смысле высоконапорные плотины в сейсмичных районах, особенно плотины статически неопределимых систем с высокими признами сработки, являются уникальными геофизическими полигонами регионального значения. По мере накопления статистического материала точность прогноза будет возрастать.

4. Возбужденная сейсмичность сама по себе не является серьезной опасностью для плотин, поскольку ее энергия, выделяемая частыми малыми порциями, на порядок ниже расчетного землетрясения по карте ОСР-97.

Ее реальная опасность может проявиться в активизации оползней и потенциально неустойчивых массивов (Вайонт, Чиркейская, Бурейская), в ослаблении контактов бетона плотины с основанием (Курпсайская, Миатлинская, Саяно-Шушенская ГЭС). Кроме того, при максимальных паводках, при быстром наполнении или

сбросе уровня водохранилища она может проявиться как нагрузка особого сочетания и должна быть учтена в расчете максимальной наблюдаемой величиной за весь период наблюдений.

5. Анализ данных таблицы 10 показывает, что наибольшая энергия возбужденных землетрясений характерна для водохранилищ большого объема и большой глубины (Акосомбо, Асуан, Гувер Кариба, Фурнас, Сринагаринд, Хсинфенкан, Токтогульское, Зейское). Это свидетельствует о решающей роли веса воды в провоцировании возбужденных землетрясений. Однако имеются случаи сильных возбужденных толчков и при сравнительно малых объемах водохранилищ (Койна, Кремаста, Оровилл, Чиркейское) при этом глубина водохранилищ порядка 100 м и более, очевидно играет более важную роль, чем его объем. Здесь причины триггерного воздействия следует искать в увеличении порового давления и фазовом переходе при близком к поверхности горизонте термальных вод. Есть водохранилища с большими объемами и глубиной (Нурекское, Саяно-Шушенское), где наблюдается большое количество толчков невысокой энергии. Возможно, в этом сказывается роль локальных полей тектонических напряжений и других особенностей основания.

6. Накопленный к настоящему времени материал исследований еще трудно поддается тотальному обобщению, анализу и математической интерпретации. Слишком сильным является влияние индивидуальных особенностей вмещающих геоблоков, конструкций плотин, характеристик и режимов эксплуатации водохранилищ. Для узких глубоких водохранилищ небольших объемов, которые быстро наполняются и срабатываются, энергия возбужденных толчков примерно эквивалентна выработанной ГЭС электроэнергии ($1 \text{ квтч} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$).

7. Материалы ICOLD подтверждают активную роль вмещающей геологической среды на НДС плотин, необходимость учета возбужденной сейсмичности, а также высокую сейсмостойкость плотин, построенных в последние десятилетия.

ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ ГЕОДИНАМИКИ НА БОЛЬШИЕ ПЛОТИНЫ

4.1. Токтогульская и Курпсайская ГЭС на р. Нарын в Кыргызстане

Новый этап исследования сейсмостойкости плотин Нарынского каскада открыт после разрушительного Сусамырского землетрясения 19 августа 1992 г. Он характеризуется широким использованием показаний измерительных систем плотин, отсчеты по которым сняты сразу после главного толчка и впоследствии наблюдались почти ежедневно в течение почти всего периода активной афтершоковой деятельности. Сусамырское землетрясение 19 августа 1992 г. с магнитудой $M = 7,3$ и интенсивностью в эпицентре 9 баллов произошло в Сусамырской впадине на глубине 25 км с координатами очага $42^{\circ}07$ с. ш. и $73^{\circ}63$ в. д. на расстоянии примерно 90 км от Токтогульской ГЭС. Расчетная интенсивность землетрясения в створе Токтогульской ГЭС составила 7,6–7,8 балла, в створе Курпсайской ГЭС – 7,2–7,3 балла. Землетрясение было неожиданным и, по заявлениям местных сейсмологов (Ф. Юдахин), не предварялось никакими прогнозными данными. Более того, очаг его оказался расположенным с северной стороны Таласо-Ферганского разлома, которая по всем ранее проведенным исследованиям считалась менее активной в сейсмическом отношении, чем южная [Крестников, Нерсесов, 1980].

Катастрофа началась подземным гулом, напоминающим взрыв и настолько сильным, что не было слышно, как падали домашние вещи, рушились трубы и печи, разваливались крыши и стены домов. Сотрясение подбрасывало сидящих на земле людей, которые не могли подняться и устоять на ногах. По земле пробегали волны, в горах прошли массовые обвалы, камнепады и оползни, отмечались «выстрелы» горных пород, били фонтаны воды высотой до 15 м. В плейстоценовой области произошли многочис-

ленные деформации земной поверхности, повреждения и разрушения зданий. Десятибалльная зона сотрясений составила 140 км², в ней были разрушены все постройки. В западной части этой зоны, в районе перевала Мустор, произошло оползание известкового сланца и гранитов со сдвижкой на 1000 м, высота стены отрыва в гранитах составила 200 м. По заключению Института сейсмологии АН Кыргызстана, землетрясение произошло в результате подвижки по зонам Каракольского и Арамсуйского глубинных разломов.

Инструментальные наблюдения были организованы эксплуатационным персоналом на Токтогульской и Курпсайской плотинах через сутки после главного толчка, в основном по двум направлениям – по опросу струнных датчиков в швах, на контактах скала–бетон и по контролю изменений гидрогеодинамического режима в основании. Несколько позже проведены геодезические наблюдения. К сожалению, последний опрос приборов перед землетрясением проводился в соответствии с утвержденным регламентом в июле, почти за месяц до толчка, что не позволяет подробно проанализировать картину подготовительного периода и установить точные сроки появления предвестников землетрясения. С 12 по 25 сентября 1992 г. персоналом Лаборатории натуральных наблюдений Токтогульской ГЭС под научным руководством А. Н. Марчука проведены исследования по изучению подготовительного периода и последствий землетрясения на плотинах Токтогульской и Курпсайской ГЭС.

Прежде всего отметим, что сейсмический удар был воспринят сооружениями гидроузлов в сравнительно благоприятных условиях: он был направлен почти по нормали к напорным граням плотин, уровень верхнего бьефа Токтогульского водохранилища был почти на 12 м ниже НПУ, бетон сооружения был предельно разогрет и сжат, швы сомкнуты.

Проведенный на месте ретроспективный анализ показаний пьезометров и измерений фильтрационных расходов на Токтогульской и Курпсайской ГЭС позволил судить об ориентировочных сроках появления предвестников Сусамырского землетрясения. Так, аномальный рост дренажного расхода при снижении

УВБ в левобережном мерном водосливе № 1 Курпсайской плотины в галерее на отм. 620 м наблюдался еще в середине июня, за 45–48 сут. до землетрясения, спустя 3 недели после сильного Кочкоратинского землетрясения 18 мая 1992 г. и остался незамеченным (рис. 40). Этот рост расходов, безусловно, сопровождался колебаниями уровней в пьезометрах, однако редкие замеры (1 раз в 3 месяца) не позволили восстановить детально их реакцию на подготовку землетрясения. Измерения на следующий день после двух сильных толчков с энергетическим классом $K = 16,2$ и $K = 16$ позволили констатировать, что на Токтогульской плотине землетрясение было отмечено группой из 16 пьезометров, расположенных в основании и береговых примыканиях нижней части плотины между отм. 683–760 м. Абсолютное

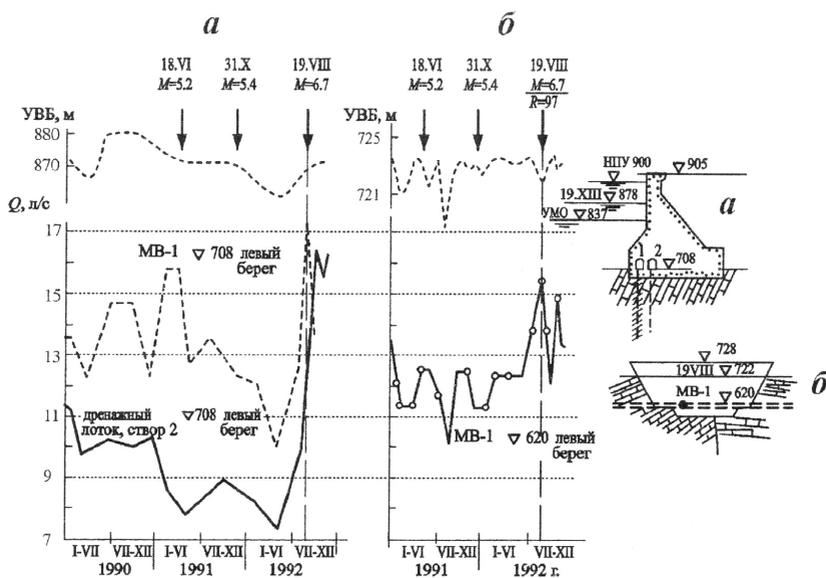


Рис. 40. Изменения фильтрационных расходов в мерном водосливе № 1 и дренажном лотке створа № 2 левого берега Токтогульской плотины (а) и в мерном водосливе № 1 левого берега Курпсайской плотины (б) в период Суамырского землетрясения 19 августа 1992 г. Толчки с $M < 5,2$ не показаны

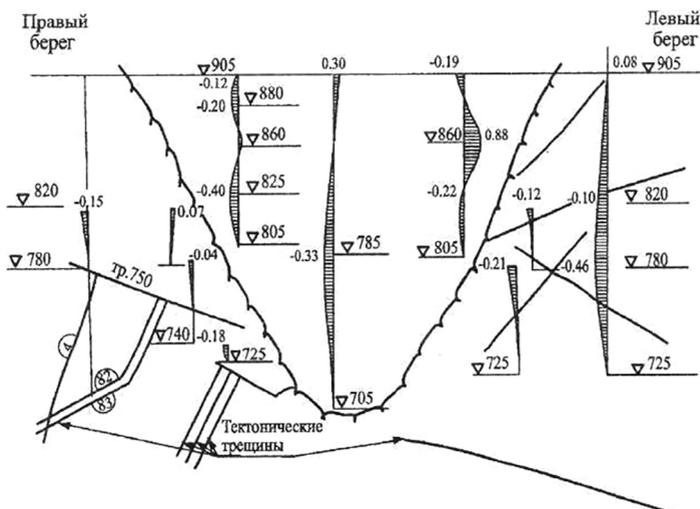


Рис. 41. Горизонтальные смещения Токтогульской плотины и береговых примыканий после Сусамырского землетрясения по показаниям отвесов

большинство этих пьезометров расположено с верхней стороны от цементационной завесы и имеют водоприемники непосредственно у тектонических трещин. Максимальные изменения пьезометрического напора произошли близ контактных поверхностей бетон-скала в нижней части береговых примыканий: у правого берега (отм. 760 м) повышение уровня на 13–17 м, у левого на отм. 735–710 м на 9–15 м. При этом фильтрационные расходы у левого берега в галерее на отм. 708 м увеличились в 1,3–2 раза по сравнению с тем же периодом 1991 г. при равных УВБ, что означает увеличение открытия трещин в массиве левобережного примыкания и повышение его водопроницаемости.

Горизонтальные смещения плотины в створе, поперек течения, зафиксированные системой прямых отвесов, свидетельствуют о наличии остаточных деформаций сжатия по направлению к правому берегу в нижней половине Токтогульской плотины (рис. 41) и соответствуют распределению литостатических напряжений. Это направление совпадает с вектором сейсмического

излучения по отношению к плотине. Перемещения верхней части плотины выше отм. 850 м соответствуют характеру действия клина в ущелье – к правому и левому берегам.

Струнные щелемеры в межсекционных швах засвидетельствовали высокие антисейсмические качества плотины с клиновидной разрезкой на секции. Из 15 измерительных точек 11 показали закрытие шва или не изменили показаний. Лишь в трех случаях в верхней части правобережного примыкания отмечено незначительное увеличение раскрытия швов. Максимальное значение раскрытия с 1,75 до 3,04 мм зафиксировал щелемер на отм. 819 м в секции П-1. Горизонтальные смещения Токтогульской плотины, измеренные геодезистами Ташгидропроекта с помощью обратных отвесов после землетрясения (20 августа) имеют максимальную величину 1,2 мм в сторону нижнего бьефа в середине русла.

Представляет интерес характер деформирования шва между плотиной и зданием ГЭС (рис. 42), установленный по результатам измерений с помощью трехосных щелемеров. Из сопоставления величин перемещений по щелемерам в шве и по прямому отвесу ПОТ-10 в середине плотины можно сделать вывод, что доля упругой составляющей значительно больше, чем в шве между плотиной и зданием ГЭС. Остаточную деформацию в шве можно с достаточным основанием считать величиной динамической деформации плотины от сейсмического воздействия на соответствующих отметках. Условная экстраполяция такого соотношения на перемещения гребня плотины как абсолютно жесткой конструкции позволяет оценить максимальную амплитуду его отклонения в НБ при сейсмическом ударе величиной около 11 мм.

Что касается приращения максимальных напряжений при сейсмическом толчке в сооружении, то их можно грубо оценить с помощью разрушенного при землетрясении верхнего патрубка пьезометра, расположенного под низовым клином плотины, где напряжения сжатия от гидростатического давления максимальны. Водоприемник этого пьезометра заглублен на 20 м ниже

контактной поверхности на расстоянии около 10 м от шва между плотиной и зданием ГЭС. После землетрясения его манометр был зашкален и вышел из строя, а патрубок оголовка оказался разорванным гидравлическим ударом. По разрывному усилию для трубы с известными размерами определено, что давление под низовым клином было более 10 МПа, что в 1,5 раза выше расчетного максимального главного напряжения сжатия.

Визуальное обследование сооружений Токтогульской ГЭС после землетрясения выявило лишь незначительные нарушения: трещины в перегородках, в стеклах некоторых оконных панелей машзала, нарушения в креплении плафонов светильников, выход из строя нескольких приборов закладной КИА. Судя по показаниям контактных пьезометров, можно сделать вывод о появлении или развитии трещин на контактных поверхностях скала–бетон, что подтверждается и увеличением фильтрационных

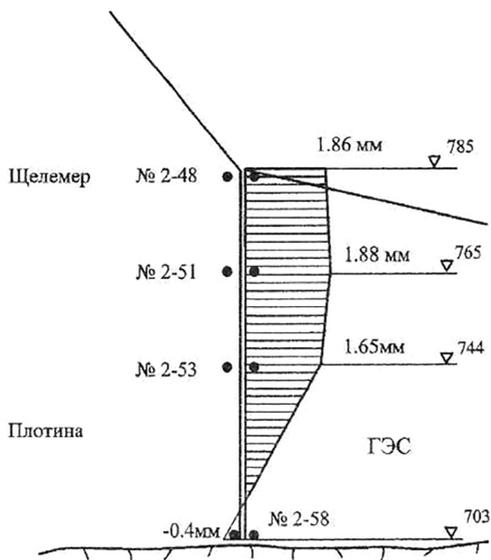


Рис. 42. Эпюра остаточных раскрытий шва между плотиной и зданием Токтогульской ГЭС после Сусамырского землетрясения 19.VIII.1992 (середина шва)

расходов. Учитывая обратимость этих явлений в целом, можно констатировать, что Сусамырское землетрясение перенесено плотиной практически без ущерба для надежности Токтогульской ГЭС и подтвердило правильность инженерных решений по обеспечению сейсмостойкости гидроузла.

Более ощутимыми оказались последствия землетрясения для плотины Курпсайской ГЭС. Прежде всего это касается контактной зоны сооружения с основанием. Деформометры, установленные в левобережном примыкании плотины на расстоянии 7–9 м от напорной грани, после землетрясения зафиксировали скачок в деформациях от 40 до 100 усл. единиц (до 4 мм). В течение последующих двух месяцев показания этих приборов изменились незначительно, т. е. имеет место необратимые деформации. Щелемеры, установленные на межсекционных швах со стороны низовой грани, отметили раскрытие швов практически по всей высоте плотины, с отм. 636 м до отм. 708 м. В верхней части плотины, на отм. 708 м, шов П у правого берега раскрылся на глубину до 3 м, а шов Л у левого берега – до 6 м, или до середины секции.

В отличие от межсекционных швов Токтогульской плотины из 18 измерительных точек с максимальным раскрытием в деформационных швах Курпсайской плотины в 10 случаях отмечено увеличение раскрытия швов на 0,1–0,4 мм с максимальными приращениями в русловой части. В 5 точках у береговых примыканий со стороны нижнего бьефа отмечено уменьшение раскрытия на 0,03–0,1 мм. Общая картина реакции межсекционных швов соответствует характеру статической работы плотины как балки-стенки, заделанной в берега и в основание.

Отклик телетензометров, установленных в бетоне плотины, проанализирован по показаниям в 7 розетках, установленных в береговых секциях. Замеренные ими деформации составили 20–90 усл. единиц, что значительно меньше деформации в швах. Наибольшие приращения остаточных деформаций от сейсмической нагрузки показали тензометры в береговых секциях и у низовой грани, т. е. в зонах максимальных статических напряжений.

Влияние землетрясения сказалось и на изменении фильтрационного режима: в левобережном примыкании плотины изменились пьезометрические уровни (повышение в пределах от 1 до 7 м, понижение (0,5–1,0 м), на 13 % возрос фильтрационный расход при практически постоянном УВБ, что означает дополнительное раскрытие контактных трещин. Значительные остаточные раскрытия швов и контактных трещин, изменения напряжений в бетоне и водопроницаемости основания, неравномерность вертикальных перемещений с подъемом береговых примыканий до 13 мм означают некоторое изменение проектной схемы статической работы плотины.

Обращает на себя внимание несимметричная реакция береговых примыканий плотины с большей деформируемостью левого берега. Именно здесь имеют место максимальные изменения в пьезометрических уровнях, длине и величине раскрытия контактных трещин, наибольшее раскрытие межсекционного шва на низовой грани секции ЛЗ – до 6 мм на отм. 708 м и максимальное вертикальное перемещение гребня. Возможно, это является следствием отмеченной ранее повышенной активности левобережной части Нарыно-Чичканского разлома и ориентации поля собственных напряжений в приповерхностной части массива горных пород, вызывающих медленное криповое движение. Эта гипотеза, однако, требует специального исследования.

После разрушительного Сусамырского землетрясения 19 августа 1992 г. в течение сентября и октября дирекцией ГЭС при методическом руководстве ИФЗ РАН были организованы ежесуточные гидрогеодинамические наблюдения и съем показаний струнных датчиков для установления и анализа откликов закладной КИА на активную афтершоковую деятельность для выяснения возможности регистрации предвестников и прогнозирования повторных сильных толчков.

Ежедневные измерения пьезометрических уровней в основании Токтогульской плотины показали их нестабильность при практически постоянном УВБ. За период особо тщательных измерений 40 напорных пьезометров с 15 по 21 сентября установлено,

что 30 пьезометров изменяли свой уровень в пределах 0,1–1,0 м при повышении УВБ за этот период на 0,3 м. Пьезометры, показавшие метровый размах колебаний, установлены на контакте скала–бетон в русловой части, за цементационной завесой, что может быть свидетельством нарушения цементационной завесы на контактной поверхности вследствие землетрясения. Неясными являются причины полного отсутствия реакций у семи пьезометров, два из которых размещены перед цементационной завесой. Возможно, их водоприемники были заглушены во время землетрясения.

В конце сентября гидрогеодинамический режим оснований Токтогульской и Курпсайской плотин практически вернулся к своему среднесезонному состоянию. Однако изменение дренажных расходов 25 сентября 1992 г. в левобережных мерных водосливах Курпсайской плотины на отм. 620 и 637 м показали их аномальный характер – увеличение расходов при снижении УВБ (рис. 43). Такой же характер носили и показания ближайших пьезометров, что позволило идентифицировать эти аномалии как предвестник сильного землетрясения. Ожидаемое время толчка было определено приблизительно по аналогам имеющегося ряда наблюдений за последние 6 лет и оглашено на совместном заседании техсоветов ГЭС и Нарынэнергогостроя. Прогноз подтвердился: в предсказанный срок, через 7 суток после перелома графика фильтрационных расходов, 18 октября 1992 г. произошел толчок энергетического класса $K = 13,2$ с координатами очага, близкими к координатам эпицентра Сусамырского землетрясения. Он был зарегистрирован в 8 измерительных точках дренажных коллекторов. По результатам этих наблюдений можно утверждать, что предвестники сильного землетрясения в виде аномального роста дренажных расходов с очагом на расстоянии до 100 км появляются за 20–25 суток до события, а изменение уровней в пьезометре при ожидании такого землетрясения – за 7–9 суток.

Специальные наблюдения с учащенными замерами дренажных расходов и пьезометрических уровней были продолжены

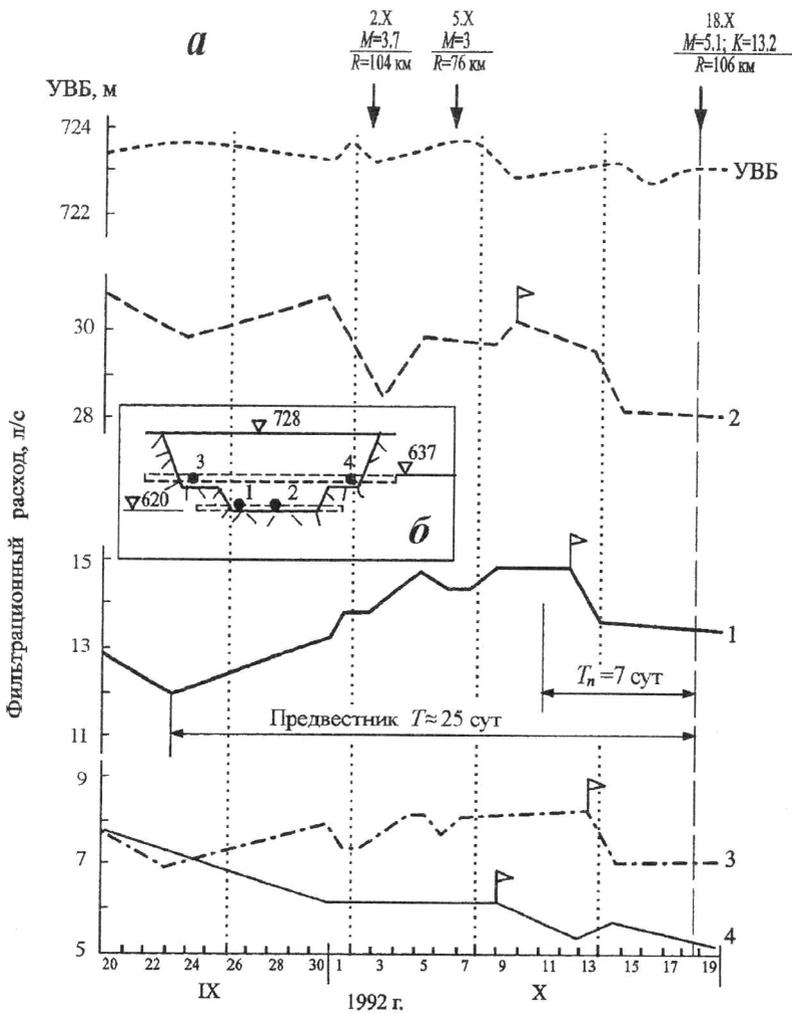


Рис. 43. Первый прогноз сильного афтершока $M = 5,3$, $K = 13,2$ Сусамырского землетрясения по ГГД-предвестникам в мерных водосливах Курпсайской плотины:
 а – графики УВБ и фильтрационных расходов в мерных водосливах 1, 2, 3, 4,
 б – схема расположения точек измерения

Лабораторией натуральных наблюдений Каскада Токтогульских ГЭС и в 1993 г. Очередные значимые землетрясения с магнитудами $M = 5$ произошли 17 марта и 13 апреля 1993 г. Событие 17 марта произошло в зоне Нарыно-Чичканского разлома на расстоянии 76 км ниже по течению от Курпсайской ГЭС и четко зарегистрировано вместе с предвестниковыми сигналами в трех мерных водосливах именно этой плотины. Землетрясение 13 апреля имело очаг в зоне Таласо-Ферганского разлома и потому лучше отмечено измерительными системами плотины Токтогульской ГЭС. Не касаясь точных количественных оценок в определении предвестников, которые требуют накопления статистического материала, этот пример позволяет утверждать возможность идентификации предвестников события $M = 5$ за 20–30 сут. до толчка с оперативным их уточнением за 2–7 сут. после изменения тренда графиков расходов, с контролем по нескольким измерительным точкам.

К сожалению, после 1993 г. учащенные отсчеты по приборам Токтогульской и Курпсайской плотин были прекращены из-за высокой трудоемкости. Штатные натурные наблюдения за последние годы позволяют сделать лишь общие выводы. За период с 1993 по 2003 г. включительно Токтогульская плотина перенесла 78 значительных сейсмических событий с магнитудами $M = 4–6$ на эпицентральных расстояниях от 28 до 270 км. Наиболее сильными были два толчка с магнитудой $M = 6$ на расстоянии 146 км 9 января 1997 г. с интенсивностью сотрясений на плотине до 5 баллов. При этом в период с 1993 по 1998 г. после Сусамырского землетрясения наблюдалось сейсмическое затишье, по 1–3 события с магнитудами $M = 4$ в год (исключение составили толчки 9 января 1997 г.). А в период с 1999 по 2002 г. наблюдается повышение сейсмической активности – по 10–13 событий $M = 4$ в год. В 2003 г. произошло 23 таких землетрясения. Борты ущелья над гребнем плотины сохраняли устойчивость.

Нормальный подпорный уровень с некоторым превышением был достигнут на водохранилище в 1994 и 2003 г. – 900,38 и 900,86 м соответственно. Подъем УВБ со скоростью 10 м/мес

(33 см/сут) не вызвал сильных возбужденных землетрясений. Тем не менее наибольшее количество толчков приходится на май-июнь и январь-март, когда скорость изменения УВБ максимальна, что свидетельствует о возможности возбужденных землетрясений. НДС плотины близко к проектному, с тенденцией к увеличению объемного сжатия. Заметна дифференцированная работа берегов и признаки крипа со стороны более высокого левого берега. Здесь в секции ЛЗ наблюдаются самые высокие напряжения сжатия в низовом клине плотины $\sigma_x = -12,10$ МПа, $\sigma_z = -11,47$ МПа.

Максимальные фильтрационные расходы зафиксированы в 1994 г. при наивысшем УВБ на уровне 87,1 л/с по мерному водосливу МВ-2, а в последующие годы они снизились до 52 л/с. Противодавление по основанию плотины меньше нормативного. Смещения плотины находятся в пределах расчетных величин. Тревогу вызывают только отдельные потенциально неустойчивые массивы на откосах у плотины, особенно на правом берегу.

В створе Курпсайской ГЭС геодинамическое влияние проявляется медленным ростом напряжений сжатия вдоль плотины, в результате которого фиксируется наклон напорной грани в верхний бьеф до 7 мм на гребне в середине русловой части. Дифференцированная работа берегов обуславливает трехкратную разницу в фильтрационных расходах по берегам с максимумом по правому берегу.

В период с 2003 по 2006 г. исследования на Токтогульской ГЭС проводились по договору с Международным научно-техническим центром (ISTC) совместно с Институтом геодинамики геосфер РАН (Н. М. Сырников). Этому периоду предшествовали землетрясения 9 января 1997 г. с $M = 6$, на расстоянии 140 км от плотины и 29 мая 1998 г. $M = 5,8$ на расстоянии 260 км. Интенсивность сотрясений на плотине составляла 4–5 баллов. За указанный период отмечен рост напряжений сжатия вдоль створа плотины с увеличением его максимального значения с 3,26 МПа в 2003 г. до 3,82 МПа в 2005 г. Контроль за смещениями бортов

ущелья с помощью тросовых отвесов по методике НАН Кыргызстана и Средазгидропроекта на высоте 100 м над гребнем плотины показал наличие дискретных обратимых вертикальных смещений до 36 мм, которые подтверждены нивелировками в штольнях пятого яруса плотины. Возможно, это влияние Карасуйского разлома, проходящего под плотиной. Прямой отвес ПОТ-10 в центре русловой части плотины во время толчков 9 января 1997 г. показал смещение в сторону нижнего бьефа на 14,5 мм, а горизонтальные колебания между берегами в верхней части плотины – от +12,5 мм до –13,7 мм с преобладающим смещением к левому берегу. Отклик на два указанных толчка зафиксирован также пьезометрами в бортах ущелья (рис. 44).

Проведенные исследования привели к следующим выводам:

1. Многократные сейсмические нагрузки от слабых возбужденных и сильных природных землетрясений влияют на НДС плотин и оснований каскада нарынских ГЭС, наиболее заметно – по контактными поверхностям. Это влияние можно контролировать с помощью имеющейся закладной КИА и других средств измерения плотины. Главную опасность для Токтогульской ГЭС представляют собой потенциально неустойчивые блоки по бортам ущелья, которые возвышаются над гребнем плотины более чем на 1000 м. Существующий метод контроля смещений бортов с помощью тросов несовершенен.

2. Сейсмогенные динамические воздействия передаются на сооружение через вмещающие массивы горных пород путем дискретных деформаций по трещинам, увеличения взвешивающего противодействия и гидродинамического давления со стороны водохранилища. Следствием этих многократных нерасчетных нагрузок могут быть остаточные деформации в швах и контактных поверхностях, разуплотнение основания с увеличением его водопроницаемости, перераспределение напряжений в теле плотины и, возможно, изменение запаса устойчивости на сдвиг. Реальной опасностью является возможное обрушение потенциально неустойчивых блоков с бортов ущелья в непосредственной близости от плотины или над ее гребнем.

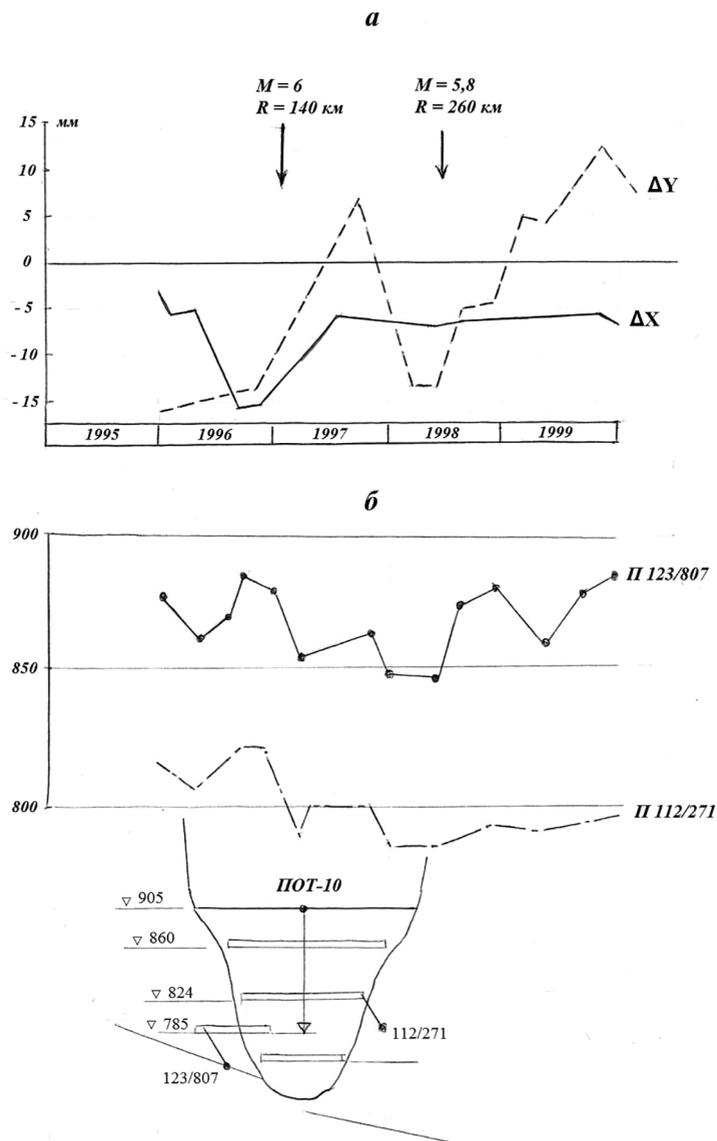


Рис. 44. Отклик прямого отвеса ПОТ-10 (а) и пьезометров в основании Токтогульской ГЭС на землетрясения $M = 6$ и $M = 5,8$ в 1997 и 1998 г.

3. Большие бетонные плотины каскада токтогульских ГЭС успешно выдержали испытание землетрясением интенсивностью более 7 баллов. Токтогульская плотина обнаружила высокие качества сейсмостойкости, правильность проектных решений с передачей нагрузки на берега, которые можно рекомендовать в качестве нормативных в аналогичных условиях.

Курпсайская плотина благодаря объемному напряженному состоянию также вполне успешно перенесла динамические нагрузки Сусамырского землетрясения, также подтвердила свою высокую надежность. Однако накопление остаточных деформаций на контактах с основанием от воздействия многочисленных перенесенных землетрясений требует проведения поверочных расчетов для определения фактических запасов надежности этого сооружения.

4. Исследования показали реальную возможность прогнозирования землетрясений с помощью измерительных систем плотин. Наиболее перспективными предвестниками могут быть аномальные фильтрационные расходы через основание, флуктуации дебита дрен и пьезометрических уровней вне зависимости от УВБ, скачки в показаниях скальных деформометров на контактных поверхностях скала–бетон и в зонах тектонических нарушений.

5. Измерительные системы плотин и высокие плотины в целом могут использоваться в интересах фундаментальной науки как уникальные геофизические полигоны для изучения механизмов возбужденной и природной сейсмичности, для прогнозирования опасных геодинамических процессов. Каскады высоких бетонных плотин, подобные нарынскому, позволяют контролировать сейсмологическую обстановку в обширных приводохранилищных регионах при условии модернизации и автоматизации измерительных систем, синхронизации их с сейсмометрическими наблюдениями.

4.2. Саяно-Шушенская ГЭС

На самой крупной плотине России проведено несколько циклов специальных исследований силами эксплуатационного пер-

сонала ГЭС по методике и при участии ИФЗ РАН (А. Марчук). Первый этап исследований в 1993 г., проведенный совместно с ВНИИГ (Крат), был посвящен в основном ретроспективному изучению геодинамического влияния на различные измерительные системы плотины, степени точности измерений, оценке последствий перенесенных землетрясений, выработке рекомендаций по совершенствованию контроля за геодинамическими воздействиями. Основная цель этого этапа – установить существование геодинамического влияния, определить особенности взаимодействия уникальной плотины с окружающей геологической средой. Кроме того, важно было выделить кластер эпицентров землетрясений, ощутимо влияющих на НДС плотины, или категорию «представительных» сейсмических событий и наиболее чувствительные к геодинамике измерительные системы. С этой целью прежде всего оценивалось «фоновое» статическое напряженно-деформированное состояние сооружения, которое оказалось весьма сложным в отличие от проектных предположений.

На этом этапе были установлены признаки возбужденной сейсмичности по анализу зависимости сейсмической активности в приводохранилищном районе от уровня водохранилища за период с 1979 по 1993 г. Главные из этих признаков:

- приуроченность наиболее сильных сейсмических событий к экстремальным уровням водохранилища;
- сгущение слабых событий в периоды быстрого изменения УВБ, в частности в марте-апреле и июне-июле 1993 г. (рис. 45);
- более высокая сейсмическая активность правого берега в зоне влияния Северо-Борусского и Кантегирского разломов. Установлено также, что наибольшей чувствительностью к геодинамическим воздействиям обладают измерительные системы, контролирующие фильтрационный режим – суммарный фильтрационный расход по основанию и по берегам, сети дренажных скважин и пьезометров, а также автоматизированные обратные отвесы.

Из особенностей взаимодействия плотины с вмещающей геологической средой отмечено прогрессирующее разуплотнение

пород основания в зонах тектонических нарушений, дифференцированная работа береговых примыканий, постепенный рост арочных напряжений сжатия, при постоянной гидростатической нагрузке. В анализе напряженно-деформированного состояния плотины обращено внимание на локальные зоны предельных состояний второй группы – трещины в анкерных опорах и в зоне сопряжения с раздельным устоем (1 столб секций 37–39). Рекомендовано осуществлять натурные наблюдения с учетом геодинамического влияния, для чего установить оперативную связь с сейсмостанцией «Черемушки» и Алтае-Саянской ОМСП СО РАН, расширить применение автоматизированных систем измерений, дооснастить береговые примыкания скальными деформометрами, тщательно контролировать локальные зоны предель-

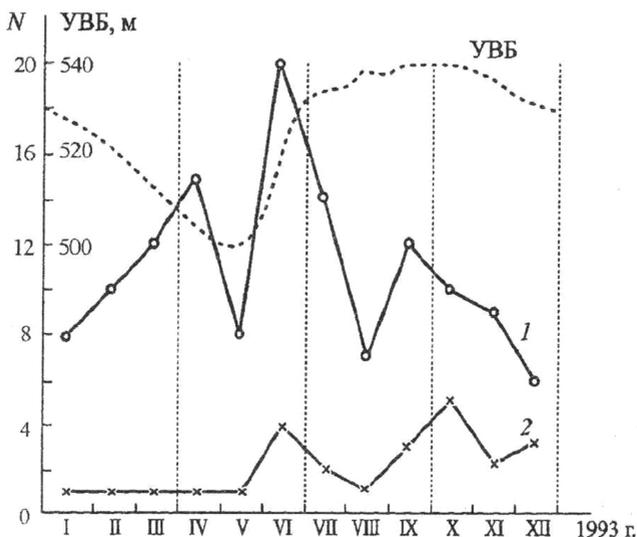


Рис. 45. Помесячное распределение сейсмических событий и изменения УВБ в створе Саяно-Шушенской ГЭС в 1993 г. по записям теплового регистратора Н-002, установленного в здании ГЭС:

1 – все зарегистрированные события, 2 – события с максимальной амплитудой более 2,5 мм/м продолжительностью более 2 минут

ных состояний в сооружении. Подчеркнута необходимость уделить особое внимание исследованию состояния береговых примыканий, в частности определению собственных напряжений в массивах горных пород береговых упоров. Указанные рекомендации, поддержанные академиками В. Н. Страховым, Е. И. Шемякиным и М. В. Курленей, руководством СШ ГЭС были в основном выполнены.

На втором этапе исследований в феврале-марте 1994 г. проведены экспериментальные полевые работы по инструментальному определению геодинамического влияния в период сработки водохранилища. Выбранное время оказалось удачным, т. к. совпало с подготовительным периодом землетрясения 14 марта 1994 г.

В связи с тем что вопрос о наличии возбужденной сейсмичности после первого этапа оставался дискуссионным, был проведен анализ сейсмологических условий в районе СШ ГЭС по данным сборников землетрясений в СССР за период с 1962 по 1990 г., а также анализ связи сейсмической активности в районе гидроузла в 1993 г. с изменениями УВБ по записям показаний теплового регистратора Н-002, установленного в здании ГЭС службой сейсмического контроля СШ ГЭС (рис. 45).

Показанное на рисунке 45 распределение сейсмособытий еще раз подтвердило связь сейсмической активности с УВБ и скоростью его изменения: пик количества толчков приходится на период форсированного наполнения водохранилища (июнь), наиболее сильные события – на периоды экстремумов в графике УВБ – май, июнь и сентябрь-ноябрь. Интересно отметить, что приведенный на указанном рисунке график распределения событий почти идентичен такому же графику для Чиркейской ГЭС с равной по высоте призмой сработки (40 м).

Для ежедневных измерений выбраны наиболее чувствительные к изменению поля напряжений измерительные системы – дренажные скважины, пьезометрические уровни, температура и химический анализ дренажных вод, деформометры на контакте скала–бетон, система автоматизированных обратных отвесов

САК ГЭС и часть струнных преобразователей, включенных в систему автоматизированного опроса. Измерения проводились в увязке с данными службы сейсмического контроля СШ ГЭС и сейсмостанцией «Черемушки» Алтае-Саянской ОМСП. На ГЭС был организован круглосуточный пост наблюдений за сейсмическими событиями и изменениями электрической нагрузки электростанции. Химлабораторией СШ ГЭС был проведен экспресс-анализ проб воды из дренажных скважин в основании четырех русловых секций плотины и в береговых примыканиях в торцах штолен на отм. 344 м. Контролировалось изменение химического состава дренажных вод по восьми параметрам: водородному показателю рН, общей жесткости, углекислоте, кальцию, магнию, хлору, сульфатам, углекислому газу, натрию и калию. При необходимости количество и частота измерений увеличивались вплоть до часовых.

Сейсмологические условия в период проведения экспериментов по сравнению со среднестатистическими данными за весь период отличались повышенной активностью: сейсмостанцией «Черемушки» с 1 по 20 марта 1994 г. было зарегистрировано 91 сейсмособытие энергетического класса от 6,7 до 12,9, в том числе одно $K = 12,9$, одно $K = 10,6$ и 20 событий $K = 9$ (без очистки от промышленных взрывов). Наиболее значительным событием было землетрясение 14 марта 1994 г. в верховьях водохранилища, в Туве, в районе г. Шагонар $K = 12,9$ на расстоянии 200–220 км к ЮВ от плотины с интенсивностью сотрясения в эпицентре около 7 баллов, а в створе плотины – более трех баллов, которое ощущалось в здании ГЭС и в пос. Черемушки. Визуальными признаками землетрясения были колебания стрелки манометров на оголовках пьезометрических скважин, активная пульсация дрен на обоих берегах, несколько ощутимых толчков отмечены постом круглосуточных наблюдений. Каталог сейсмических событий энергетического класса $K \geq 7$ на расстоянии до 150 км, зарегистрированных сейсмостанцией «Черемушки» за период с 24.02 по 01.04.94, обработанный Алтае-Саянским ОМСП, представлен в таблице 11.

**Каталог сейсмических событий в районе Саяно-Шушенской ГЭС
за период с 1 по 20 марта 1994 г.**

Дата	Координаты		К	R	Примечания
	λ	ϕ			
28.02.1994	53,73	91,05	1,7	100	Взр.
01.03.1994	53,31	91,46	7	65	
02.03.1994	54,00	92,72	7,2	150	Взр.
03.03.1994	53,9	90,40	7	155	Взр.
03.03.1994	53,59	91,35	9,3	85	Взр.
04.03.1994	53,76	91,10	8,1	125	Взр.
05.03.1994	53,58	91,42	7,7	100	Взр.
05.03.1994	53,76	91,04	9,3	120	Взр.
07.03.1994	51,37	91,86	8,6	170	Взр.
07.03.1994	52,35	89,53	7,7	130	Зем.
11.03.1994	53,76	91,02	9,2	100	Взр.
11.03.1994	53,60	91,44	9,0	90	Взр.
13.03.1994	50,90	92,39	12,9	200	Зем
14.03.1994	53,48	91,43	7,4	100	Взр.
15.03.1994	53,72	91,11	7,9	100	Взр.

Геодезические измерения осуществлялись по автоматизированным отвесам в основании секций 18 у левого берега, с. 33 в середине русла и с. 45 у правого берега по 2–3 раза в день, а с 14 марта 1994 г. – ежечасно. Наиболее значительная обратимая подвижка у всех трех секций на отг. 282 м по течению, по оси X – до 8 мм, с. 45 в сторону нижнего бьефа и до 5 мм в с. 18 в сторону верхнего бьефа произошла 21 март (рис. 46). Динамический, обратимый характер смещения свидетельствует о его сейсмогенном происхождении, вероятно под влиянием сейсмособытий 14 и 18 марта, соответственно, с магнитудой $M = 5,2$ и энергетическим классом $K = 8,8$ и $8,9$, а возможно, и землетрясения 21 марта $K = 8$ или их

резонансного наложения. Отвесы с глубокими якорями в основном были неподвижными, кроме якоря в основании с. 33, в зоне руслового разлома, где в периоды 1–8 марта и 14–25 марта отмечены подвижки до 1 мм. По оси Y (поперек течения) колебания отмечены только в основании с. 18, в зоне вероятного влияния тектонического нарушения П-6,7 (рис. 17). Можно полагать, что заделка якоря этого отвеса оказалась в подвижном блоке, в зоне нулевых напряжений сжатия и пульсирующего гидродинамического давления по границам этого блока.

Контроль фильтрационного режима осуществлен по 45 пьезометрам в основании секций 18, 28, 39, 45 и в береговых штольнях на отм. 344 м, по дебиту дрен, температуре и химическому составу воды из 6 дренажных скважин в указанных секциях и штольнях. На фоне монотонного и почти равномерного снижения УВБ со средней скоростью 30,6 см/сут наблюдались значительные флуктуации пьезометрических напоров, фильтрационных расходов (дебита дрен) и температуры. Кратковременные колебания пьезометрических уровней достигали максимальных значений 4,5–5 м в течение 2–3 сут., что в несколько раз превышало величину изменений УВБ за тот же период. Колебания температуры были в пределах точности измерений, за исключением дрены № 4 в основании с. 18 в зоне тектонического нарушения П-6,7, где 3 марта она повысилась на 0,3 °С от фонового значения 4,1 °С.

На фоне общего снижения параметров фильтрационного режима в согласии со снижением УВБ выделяются аномальные повышения пьезометрических уровней 3–4 марта, 7–8 и 27–28 марта 1994 г. Выделяются также резкие падения пьезометрических уровней контактного пьезометра П-4 в основании с. 45 на 112 м с 3 по 13 марта с последующим восстановлением 14 марта на 90 м; левобережного пьезометра ОПВ-11 и контактного пьезометра П-4 с. 39 с 26 февраля по 13 марта на 10 м (рис. 47). Необходимо отметить, что пьезометр П-4 в основании с. 45 расположен вблизи тектонического нарушения П-1 под напорной гранью этой секции. Указанные аномалии в сочетании с ростом

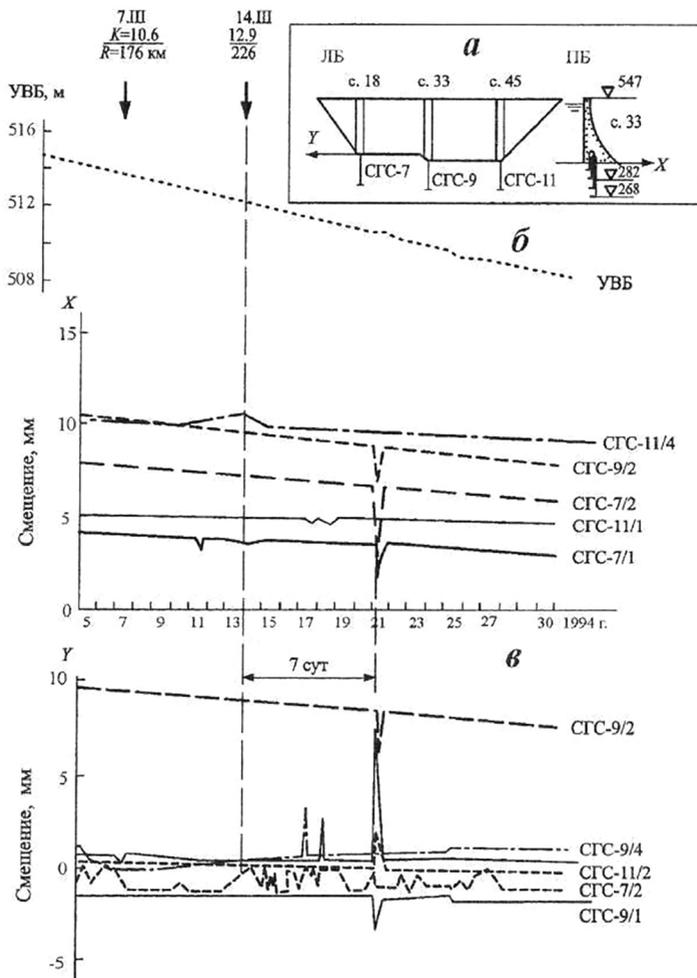


Рис. 46. Отклик автоматизированных обратных отвесов в основании плотины Саяно-Шушенской ГЭС на сейсмические события в марте 1994 г:

а – схема расположения отвесов в сечениях 18, 33, 45,

б – смещения по оси X, по течению, в – смещения по оси Y

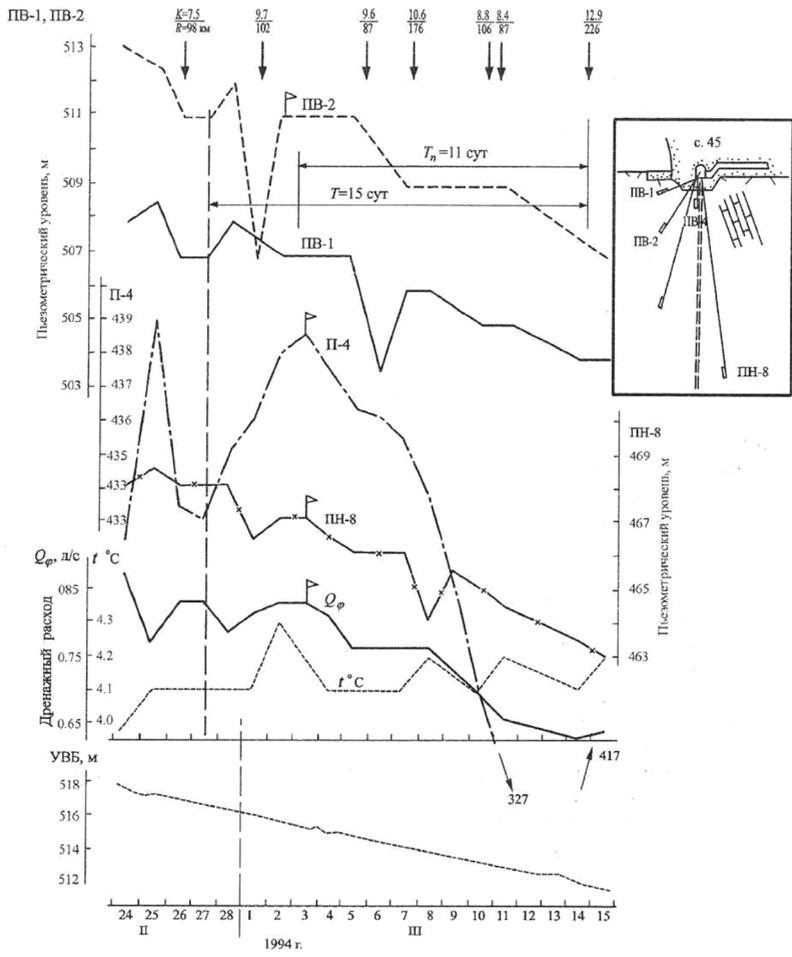


Рис. 47. Изменения фильтрационного режима (пьезометрических уровней, дренажного расхода, температуры и УВБ) в основании секции 45 плотины Саяно-Шушенской ГЭС в период подготовки землетрясения 14 марта 1994 г. На врезке показана схема расположения пьезометров и дрен в основании секции 45

фильтрационных расходов в основании секций 25, 30, 33, 34, 44 и 45 на фоне снижения УВБ и также температуры дренажных вод в с. 18, 45 можно считать значимыми прогностическими признаками землетрясения 14 марта 1994 г., а землетрясение 7 марта 1994 г. — форшоком этого события.

Телеметрические наблюдения за изменениями НДС плотины проведены по 548 струнным преобразователям линейных деформаций, из которых 289 приборов в шестнадцати русловых секциях на 7 нижних ярусах галерей опрашивались ежедневно в ручном режиме и 259 приборов в 15 секциях на трех верхних отметках галерей — в автоматическом режиме. В качестве критерия появления отклика при оперативной статистической обработке нами принято изменение отсчета по периодомеру более чем на 10 мл/с, что превышает предел точности отсчета.

Основные результаты обработки отдельно по группам ручного (более надежного) и автоматизированного опроса показали следующее:

1. Из общего количества опрошенных вручную датчиков за период с 28 февраля по 15 марта 1994 г. доля приборов, откликнувшихся на одно или несколько сейсмических событий, составляет 39,2 %, в том числе 7 % показали отклик на все события. Эта последняя группа приборов расположена в основном в приконтактной области напорной грани плотины в зоне растяжения и в низовом клине плотины в зоне максимального сжатия в секциях 25 и 30, в основании которых проходит русловой разрыв.

2. Большей чувствительностью к динамическим нагрузкам отличается станционная часть плотины: если в пределах секций 18–34 на сотрясения откликаются 44–49 % датчиков, то в пределах более жесткой водосливной части — 28–32 %. Здесь также сказывается влияние руслового разрывного нарушения под станционной частью плотины. Особое место в составе водосливной плотины занимает первый столб с. 39, где на сейсмические события откликаются до 60 % приборов. В этом случае, вероятно, имеет место влияние раздельного устоя, бетонной продольной перемычки, примыкающих к с. 37–39 и пересекающих все

четыре тектонические зоны, а возможно, и трещина в верховом клине плотины с отм. 345 м до основания.

3. По высоте плотины выделяется зона у напорной грани в пределах отметок 332–359 м, где доля чувствительных к сотрясениям датчиков достигает значений 63–70 %. Именно в этой зоне наблюдается интенсивное трещинообразование и максимальные фильтрационные протечки. Второе место по чувствительности к геодинамике занимает пригребневая часть плотины – 39 % откликнувшихся приборов по данным автоматизированного опроса.

4. Наибольшее число приборов – 94 из 289 шт., или 32,5 %, откликнулось на землетрясение 14 марта 1994 г. ($K = 12,9$), 66 приборов – на событие 7 марта ($K = 8,6$ и $7,7$), 57 шт. – на событие 28 февраля ($K = 9,7$), 34 шт. – на событие 3 марта ($K = 9,3$ и $7,0$).

Группа приборов автоматизированного опроса показала примерно такой же процент отклика (36 %), симметричную работу арки в пределах отметок 503–507 м и большую чувствительность гребня в правобережной части, что согласуется с общей картиной НДС плотины. На рисунках 47–49 показаны примеры отклика некоторых типов струнных преобразователей в плотине на сейсмические события этого периода.

Геохимические исследования, проведенные силами химлаборатории СШ ГЭС, имели целью изучить изменения концентрации растворенных макрокомпонентов минерального состава дренажных вод: показатель рН, содержание углекислого газа, ионов кальция, магния, хлора, сульфатов, суммы ионов натрия и калия, показатели жесткости и щелочности (рис. 50).

Известно, что в основе причин изменения концентрации химических веществ лежит представление о том, что при увеличении тектонического сжатия к дренажным скважинам начинает поступать сильно минерализованная вода из застойных зон и глубинных водоносных горизонтов [ГЕОХИ, 1985]. Поэтому для отбора проб были определены дренажные скважины, предположительно имевшие гидравлическую связь с зонами тектонических нарушений и крупных трещин, дрены с проявлением

аномалий и с сильной пульсацией дебита. Аномалии имели место в основании секций 18, 39 и 45 в виде скачкообразных изменений пьезометрических уровней и фильтрационных расходов. Секция 28 выбрана из-за расположения над русловым разрывом и максимального фильтрационного расхода через основание. Были учтены также особое положение с. 39 на границе ГЭС и водобойного колодца и высокая оснащенность КИА с. 18 и 45

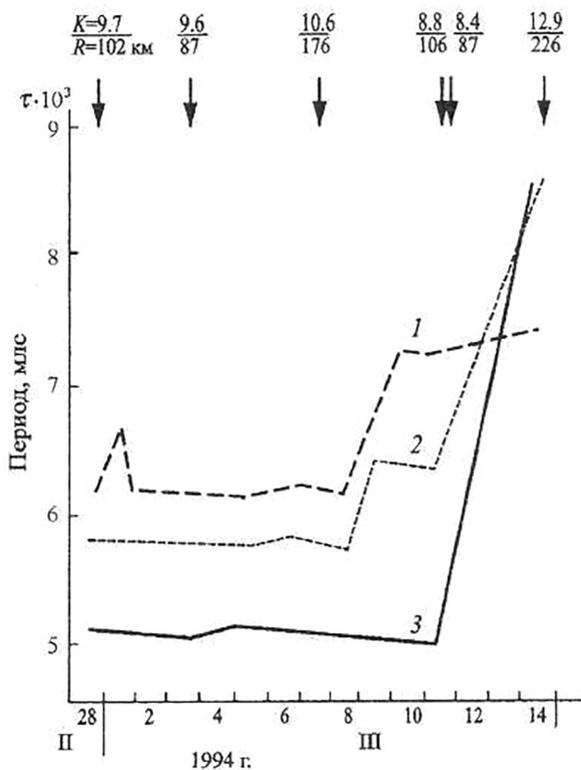


Рис. 48. Отклик закладных датчиков в бетоне секции 33 плотины Саяно-Шушенской ГЭС на сейсмические события в марте 1994 г.: 1 – телетензометр ПЛДС-400 на отм. 504,5 м по оси секции в арочном направлении, 2 – датчик порового давления ПДС-10 на отм. 461 м, 3 – щелемер ПЛПС-10 в межсекционном шве на отм. 504,5 м

в целях комплексного анализа. Они показали, что активное варьирование химического состава дренажных вод свидетельствует о наличии непрерывных динамических процессов в основании плотины СШ ГЭС. Наибольшие размахи вариаций отмечены со

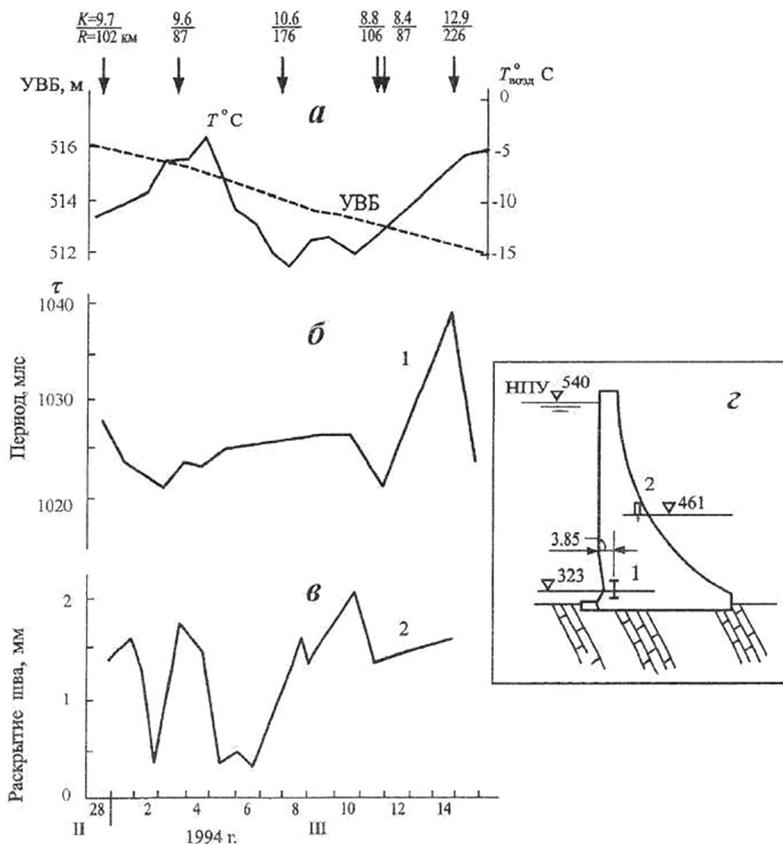


Рис. 49. Изменения раскрытия горизонтальных швов у граней секции 33 плотины Саяно-Шушенской ГЭС под влиянием температуры воздуха и сейсмических событий:

a – график УВБ и температуры воздуха, *б* – показания телетензометра ПЛДС-400 у напорной грани, *в* – показания шелемера ПЛПС-10 у низовой грани, *з* – схема размещения приборов

стороны правого берега, что подтверждает его более высокую сейсмическую активность. В соответствии с данными ГЕОХИ, изменения концентрации химических веществ могут быть предвестниками землетрясения, если превышают фоновое значение в 3 и более раза по схеме: подъем—пик—спад—толчок. В нашем случае предвестниками землетрясения 14 марта 1994 г. можно считать флуктуации сульфатов в основании с. 45, углекислого газа, а также суммы ионов натрия и калия в правобережной штольне. Таким образом, установлено, что геохимический анализ может быть использован в прогностических целях.

Третий этап исследований был посвящен изучению работы береговых примыканий плотины, через которые главным образом

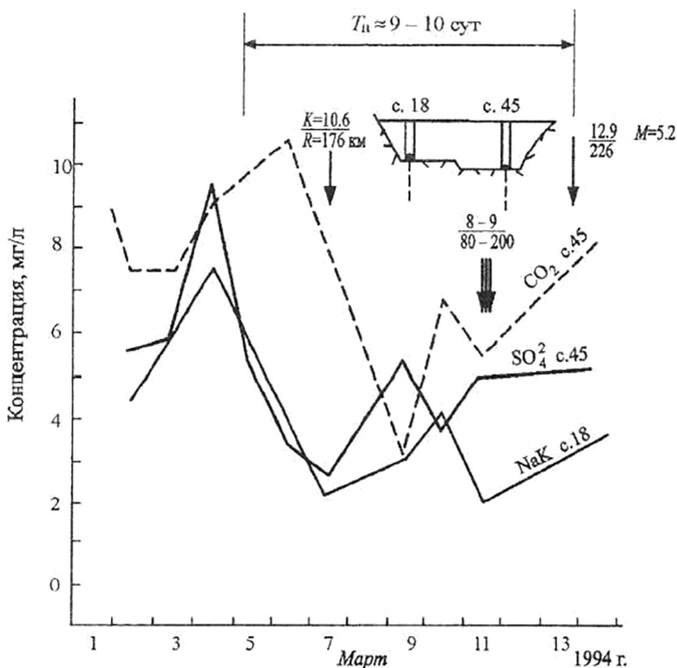


Рис. 50. Изменение концентрации химических веществ в дренажных водах основания секций 18 и 45 плотины Саяно-Шушенской ГЭС перед землетрясением 14 марта 1994 г.

и передается геодинамическое влияние. К сожалению, собственно береговые примыкания в период проведения исследований были слабо оснащены измерительными системами. Поэтому для поставленных целей использовались струнные преобразователи прибрежных с. 18 и 45, береговых с. 10 и 55, трех ярусов береговых штолен и редкие контактные деформометры в берегах.

Перед началом работ по исполнительной геологической документации и накопленным материалам натурных наблюдений проведена оценка геоструктурных особенностей береговых упоров, характер их отклика на техногенные и температурные воздействия.

Левобережное примыкание располагается на борту глубокого лога, впадающего в русло реки и представляющего собой размытую тектоническую трещину, оперяющую разрывную зону П-6 (рис. 17). Субпараллельно этой зоне, на расстоянии 70–90 м проходит тектоническая зона П-8. Зона П-6 находится под верховой гранью с. 22–23. Зона П-8 простирается в основании верховой грани с. 8 и 9 и под низовой гранью с. 14 и 15. Эти тектонические субвертикальные зоны создают потенциальные поверхности сдвига в тангенциальном направлении и компоненту силы от давления арки, направленную в сторону верхнего бьефа. Указанные зоны определяют неравномерное распределение прочностных и упругих характеристик в примыкании: в основании напорной грани с. 9–17 и в центре вмещающего отрога модуль деформации имеет значение 18 ГПа, а под низовой гранью 10 ГПа. Кроме того, на участке с. 12–14 на отм. 330–360 м вскрыт горизонт трещинных подземных вод, который означает, что тектонические зоны имеют гидравлическую связь по пологонаклонным субгоризонтальным трещинам с низкими параметрами сопротивления сдвигу. Левобережное примыкание в конструктивном отношении не было выполнено ступенчатыми полками по проекту, как это было сделано на правом берегу. При разработке котлована врезки левобережного крыла плотины порода обрушилась по гладкой поверхности двух субвертикальных тектонических нарушений П-6 и П-8. Совокупность

этих аномалий в сочетании с большей арочной нагрузкой на левый берег из-за особенностей конструкции и производства работ создали резко неравномерное распределение напряжений с высокой их концентрацией в центральной области примыкания с максимумом до 16–18 МПа в с. 3. Эта концентрация напряжений на сравнительно узком напорном фронте и определила повышенную податливость левобережного примыкания, а ориентировка поверхности примыкания – направление векторов смещения в сторону верхнего бьефа и вверх. Наиболее четко такой характер смещений проявляется при импульсных сейсмогенных или тектонических нагрузках.

Главной особенностью правого берега является наличие здесь активного Борусского разлома и хребта Борус с максимальной высотой около 2000 м. Северная часть Борусского разлома проходит на расстоянии 6 км от примыкания плотины. Кроме того, массив правобережного упора имеет высоту примерно на 70 м больше левобережного и отличается техногенной нарушенностью. Здесь построены два транспортных тоннеля, две изыскательские штольни и четыре полки бетоновозных дорог строительного периода. Правобережный упор плотины расположен между двумя крупными оврагами, он более пологий, выполнен уступами в соответствии с проектом. Со стороны низовой грани здесь разведана система пологих трещин с мощностью зоны дробления до 1,5 м и модулем деформации 5 ГПа. Она падает к реке с разворотом в сторону верхнего бьефа.

В техпроекте и при изысканиях геологами подчеркивался высокий уровень собственных напряжений в береговых массивах и различия в свойствах пород. По данным исследований напряжений методом разгрузки торца скважин, проведенных в 1962–1963 гг. геологическим факультетом МГУ под руководством проф. Г. С. Золотарева [Кутепов, 1965], были получены следующие значения собственных напряжений на левом берегу: вертикальные 24,5–48,0 МПа, горизонтальные 24–36 МПа. На правом берегу вертикальные 14,8–32,5 МПа, горизонтальные 10,2–21,7 МПа, при этом отношение горизонтальных напряжений

к вертикальным на правом берегу составляло 0,8 от левобережного, что обусловило с учетом других перечисленных особенностей большие сдвиговые смещения правобережного крыла плотины под действием гидростатической нагрузки. Основные подвижки в правобережном примыкании произошли в период первого наполнения водохранилища в 1978–1990 гг., когда в отдельные годы (1982, 1983) УВБ поднимался на 80–90 м.

Впервые масштабные специальные исследования НДС в береговых примыканиях были проведены в 1995–1997 гг. Институтом горного дела СО РАН [Барышников, Гахова, 1999] путем измерения деформаций по длине штольни с помощью кварцевых и титановых штанг с индикаторами часового типа. Установлено, что приращения деформаций в арочном направлении в 1996–1997 гг. к периоду НПУ 1995–1996 гг. на правом берегу в 2 раза больше, чем на левом, причем эти соотношения различны по высоте примыканий. Например, на отм. 467 м приращения смещений в сторону сжатия на левом берегу при изменении УВБ от 500 до 540 м в 1,8–1,9 раза больше, чем на правом. При этом область деформирования распространяется на всю длину штольни, включая аномальные зоны, расположенные на удалении 5–6 м и 30–35 м от контакта, где проходят крутопадающие тектонические трещины.

На отметке 413 м отмечается принципиально разный характер деформирования левого и правого бортов: на левом – сжатие 0,7 мм, на правом – растяжение +0,6 мм. На отм. 344 м приращения смещений в сторону растяжения на правом берегу у торца штолен в 2,5–2,9 раза больше, чем на левом. Такой характер деформаций в горных массивах примыканий соответствует предположению о криповом давлении со стороны правого берега с вектором подвижки в сторону левого берега и в нижний бьеф.

Существенное значение для понимания геодинамических процессов в береговых примыканиях имеет изучение их фильтрационного режима. С этой целью проанализированы графики дебита 28 дрен в штольнях обоих берегов на отметках 467, 413 и 344 м, из которых 11 дрен пульсирующих. По характеру графи-

ков все дрены можно разделить на три группы. Первая – наиболее многочисленная с явной зависимостью от УВБ, относительно большими расходами и малыми флуктуациями. Почти все они находятся на отм. 467 м и, очевидно, имеют гидравлическую связь с водохранилищем по крупным трещинам. Вторая характеризуется некоторым средним постоянным дебитом с редкими большими флуктуациями. Эти дрены находятся на участках высоких напряжений сжатия и откликаются только на сильные геодинамические воздействия. Большинство их расположено на левом берегу. Третья – очень слабо реагирует на изменения УВБ и геодинамические влияния, имеет малый и почти постоянный дебит, расположена в зонах максимального сжатия в слаботрещинчатой скале.

Поиск корреляций дебита с сейсмическими событиями $K = 10$ по времени появления флуктуаций $T = f(K)$ и амплитуды этой флуктуации $A = f(K)$ в зависимости от энергетического класса событий (табл. 12) показал, что наиболее плотная связь имеет место на нижних отметках для второй и третьей групп дрен, близких к тектоническим нарушениям и дайкам, а также в зонах контакта сооружения с вмещающими породами. Наибольшие коэффициенты корреляции характерны для пульсирующих дрен. Максимальные флуктуации дебита дрен совпадают по времени с периодами подъема УВБ и экстремальных горизонтов УВБ (июнь-август и сентябрь-октябрь). Два наиболее сильных толчка $K = 13$ в 1994 и 1996 г. произошли в период сработанного водохранилища – 14 марта и 4 апреля соответственно, что позволяет предполагать наличие возбужденной сейсмичности. По характеру работы дренажных скважин в береговых примыканиях видно, что дренажная система плотины СШ ГЭС не только уменьшает противодействие, но и является демпфером, ослабляющим воздействие сейсмических нагрузок на сооружение по контактам с основанием. Чувствительность этой системы к подготовительному периоду землетрясений с очагами даже на расстоянии до 400 км является необычайно высокой. Предвестники Алтайского землетрясения, например, в виде остропикового

аномального увеличения дренажных скважин и пьезометрических уровней при постоянном УВБ на 10–30 % появились за 40 суток до события.

Таблица 12

**Связь времени появления предвестника $T = f(K)$
и его амплитуды $A = f(K)$ с энергетическим классом
ожидаемого землетрясения в береговых дренах плотины СШ ГЭС**

Берег	Штольни, номера дренажных скважин	Коэффициент корреляции		Примечания
		$T = f(K)$	$A \% = f(K)$	
Правый	ЦДП-1 ∇467 м, дрена № 1`	0,53	–	Дрена № 1` имеет гидравлическую связь с дайкой 5, отличается мутностью воды и выносом сульфатов
	ЦДП-2 ∇413 м, дрена № 12	0,62	–	Пульсирующая дрена у трещины V-7 ближе к торцу штольни
	ЦДП-3 ∇344 м, дрена № 35	0,75	0,48	Сильно пульсирующая дрена с большим дебитом, возможно, имеет гидравлическую связь с тектоническим нарушением IV-I, с дайками 4 и 5
Левый	ЦДП-1, ∇467 м, дрена № 12`	0,59	0,62	Пульсирующая дрена в зоне дайки 5
	ЦДЛ-2 ∇413 м, дрена № 8 дрена № 8`	0,73 0,67	0,52 0,62	В районе тектонического нарушения II-10, в основании с. 6 и 7. Пульсирующая дрена в зоне II-10, с. 6 и 7
	ЦДЛ-3, ∇344 м, дрена № 24 дрена № 58	0,68 0,60	– –	Пульсирующая дрена в торце штольни, пульсирует при НПУ

Специальные исследования в береговых примыканиях проводились в период минимальных уровней водохранилища в апреле 1996 г. и при УВБ, близком к НПУ, в августе 1997 г. Результаты измерений в период сработки водохранилища до отметки 500 м

показывают, что дебит большинства дрен изменяется в соответствии с изменениями УВБ, но происходит дискретно, с флуктуациями, под влиянием изменений поля напряжений от геодинамических воздействий. Скальные деформометры в период увеличения расходов из дренажных скважин показывают увеличение сжатия в породах основания, что означает выжимание депонированных трещинных вод в дренажную сеть. После смыкания трещин дебит падает. В период подъема УВБ быстро увеличивают дебит скважины, близкие к контакту плотины со скалой или к тектоническим нарушениям в штольнях на отм. 413 и 344 м. Дебит и температура дренажных вод флуктуируют под влиянием сейсмических событий. В большинстве случаев при увеличении расхода температура падает. Повышение температуры, как правило, наблюдается после толчка. Пьезометры в штольнях менее чувствительны к изменениям поля напряжений, особенно на левом берегу, где уровень сжатия выше. Тем не менее они также откликаются на сейсмические события изменениями уровня, не связанными с изменениями УВБ. Привязка контрольных дрен в русле и береговых примыканиях к особенностям основания и к местам установки длиннобазовых деформометров позволила экспериментально определить зависимость между деформациями в массиве пород и дебитом дрен (рис. 51), что подтверждает роль флюида как индикатора изменений поля напряжений во вмещающей геологической среде.

Деформации береговых примыканий в эти же периоды контролировались измерением длин штолен, вертикальных смещений по маркам гидростатических нивелиров и скальным деформометрам. В период снижения УВБ, в апреле 1997 г., фиксировались деформации сжатия в зоне контакта плотины с береговыми упорами и растяжение в концах штолен из-за разгрузки береговых массивов. При этом значения деформаций растяжения на правом берегу в 7 раз больше, чем на левом. На отм. 467 м в левобережной штольне обнаружена аномальная зона с максимальными укорочениями (зона трещин). Результаты измерения длин совпадают качественно с данными ИГД СО РАН. Гидростатическими

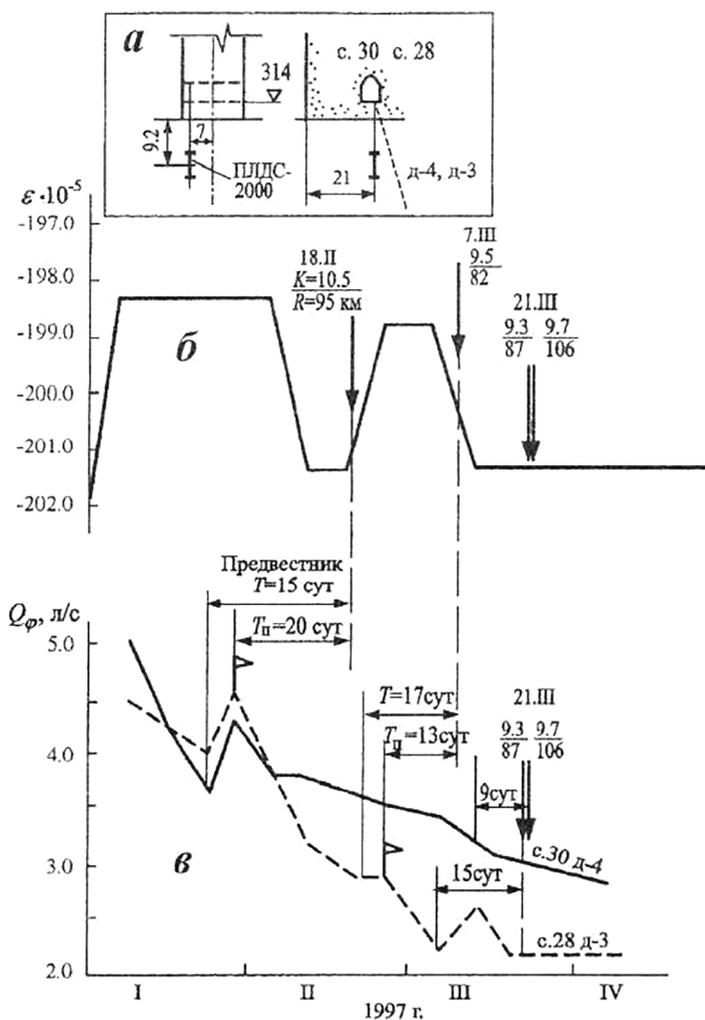


Рис. 51. Связь изменений дебита контрольных дрен и деформаций в основании русловых секций 28 и 30 плотины Саяно-Шушенской ГЭС под влиянием сейсмических событий:
а – схема расположения приборов,
б – показания деформометра ПЛДС-2000,
в – дебит дрен д-3 и д-4 в основании секций 28 и 30

нивелирами в этот период обнаружено скачкообразное восстановление осадок, особенно заметное в приконтактных зонах на отм. 467 м. В левобережной штольне оно составило 2,2 мм за 8–9 апреля, после двух сейсмических толчков 8 апреля; в правобережной штольне – на 1,54 мм. В штольне на нижней отм. 344 м замечена обратная картина: в зоне правобережного контакта произошло увеличение осадки на 0,36 мм, на левом берегу – на 0,21 мм.

В период подъема УВВ с 13 по 22 августа 1997 г., когда велись непрерывные измерения, гидронивелиры в береговых штольнях показывали приращения осадок с максимумом 0,9 мм у марок левобережных штолен на отм. 467 и 413 м. Вместе с тем на нижней отметке 344 м пять марок показали подъем до 0,22 м. Не исключено, что это связано с толчками 12 и 17 августа 1997 г. и деформацией надвига.

Результаты наблюдений по измерению длин и нивелирам показали, что характер деформаций в штольнях по берегам различен и по величине, и по знаку из-за конструктивных особенностей сооружения, геоструктурных различий береговых примыканий и наличия руслового разлома. Максимальные флуктуации НДС имеют место в верхней части примыканий, в зонах переменного уровня, тектонических нарушений и даек (отм. 467 м и выше), а в нижней части поле напряжений стабилизировалось.

Геохимический анализ с ежедневным отбором проб дренажных вод в марте 1994 г., декабре 1996 г., апреле и августе 1997 г. показал сходные по берегам изменения концентраций химических веществ (табл. 13), что свидетельствует об их региональном характере. Вместе с тем заметно различие между русловой частью и берегами, обусловленное, вероятно, наличием руслового разлома и выходом грунтовых вод на левом берегу. Минерализация дренажных вод правого берега и русловой дрены в зоне тектонического разрыва на 40 и 20 % соответственно выше левобережных. Наибольшие флуктуации концентраций химических элементов связаны с сейсмическими событиями, их подготовкой и последствиями.

Обобщение и анализ материалов геохимических исследований за период 1996–2008 гг. показали заметный тренд повышения концентрации растворенных химических веществ в дренажных водах основания плотины, что является свидетельством развития процессов химической суффозии и разуплотнения основания. Более того, есть признаки увеличения минерализации после значимых землетрясений – Красноярского и Горно-Алтайского.

Очередной цикл измерений выполнен в ноябре–декабре 1998 г. по дебиту контрольных дрен, температуре дренажных вод, прямым и обратным отвесам в секциях 10, 55, 18 и 45, контактными деформометрам, маркам гидронивелиров в штольнях, арматурным динамометрам в тросах крепления потенциально неустойчивого массива на левом берегу. Указанный период отличался спокойной сейсмологической обстановкой и медленной равномерной сработкой водохранилища со скоростью снижения УВБ в среднем 7 см/сут.

Из значимых сейсмособытий по бюллетеням сейсмостанций «Черемушки» и «Джой» можно выделить только два: 7 декабря 1998 г. толчок энергетического класса $K = 9,6$, $R = 86$ км и 10 декабря 1998 г. $K = 9,1$, $R = 100$ км.

Никаких сильных техногенных воздействий на плотину в этот период также не было. Из-за слабых геодинамических воздействий цикл измерений в 1998 г., несмотря на большой объем работ, оказался недостаточно информативным. Контроль фильтрационного режима выявил наиболее заметную аномалию роста дебита дрен на 12 % 29–30 ноября на обоих берегах в штольнях на отм. 413 и 344 м, которая может быть идентифицирована как предвестник землетрясения 7 декабря. Отклик этого события обнаружен и в показаниях пьезометров. Графики изменения температуры дренажных вод на обоих берегах имеют три характерных подъема, каждый из которых предваряет сейсмическое событие, но их величины находятся в пределах точности измерений. Анализ концентрации химических веществ также не выявил значимых флуктуаций.

Наблюдения за деформациями по прямым отвесам с. 10 и 55 зафиксировали аномальные отклонения гребня секций в нижний бьеф и к правому берегу, но эта аномалия является откликом не столько на сейсмические события, сколько на резкое понижение температуры воздуха. Более надежными в смысле геодинамической природы деформаций являются показания обратных отвесов в основании с. 18 и 45, особенно в тангенциальном направлении, менее подверженные температурным влияниям. Якоря обратных отвесов в с. 18 сохраняли тенденцию смещения в верхний бьеф и к левому берегу, якоря с. 45 — к левому берегу и в нижний бьеф. Незначительные флуктуации показаний отвесов в размере 0,2–0,5 мм имели связь по времени с сейсмическими событиями. Эти показания подтверждаются отвесами и в основании с. 33, что свидетельствует о региональном характере явления и отклика по всей подошве плотины. Как правило, указанные смещения находились в пределах точности измерений. Главный вывод из этого цикла наблюдений состоял в том, что при сейсмическом затишье и медленном изменении УВБ в системе «плотина-основание» устанавливается квазистатический режим, а геодинамическое влияние практически не проявляется.

В последующие годы сейсмическая активность в регионе постепенно повышалась, и 27 октября 2000 г. произошло землетрясение $K = 13,6$ с эпицентром в координатах 54,8 с. ш., 94,9 в. д., зарегистрированное сейсмостанциями Саяно-Шушенской и Красноярской ГЭС. В связи с этим событием были проанализированы материалы натуральных наблюдений на обеих гидроэлектростанциях и проведено визуальное обследование сооружений. Установлено, что землетрясение предвлялось за 24–27 суток аномальными изменениями параметров фильтрационного режима в основании обеих плотин, показаниями автоматизированных обратных отвесов в основании плотины СШ ГЭС (рис. 52–53). Никаких повреждений и ущербов для плотин обнаружено не было. Вместе с тем комплексный анализ материалов натуральных наблюдений за 1999 и 2000 г. выявил несколько необратимых тенденций в состо-

янии плотины СШ ГЭС и ее основании. Во-первых, с 1997 г. резко сократились фильтрационные расходы по берегам, во-вторых, отмечено продолжение процесса роста арочного сжатия в плотине, несмотря на принятое решение об уменьшении НПУ с 540 до 539 м, в-третьих, обнаружился подъем реперов «воронки оседания» в верхнем и нижнем бьефе.

В плотине в целом отмечен рост арочного сжатия, особенно со стороны низовой грани. В некоторых измерительных точках

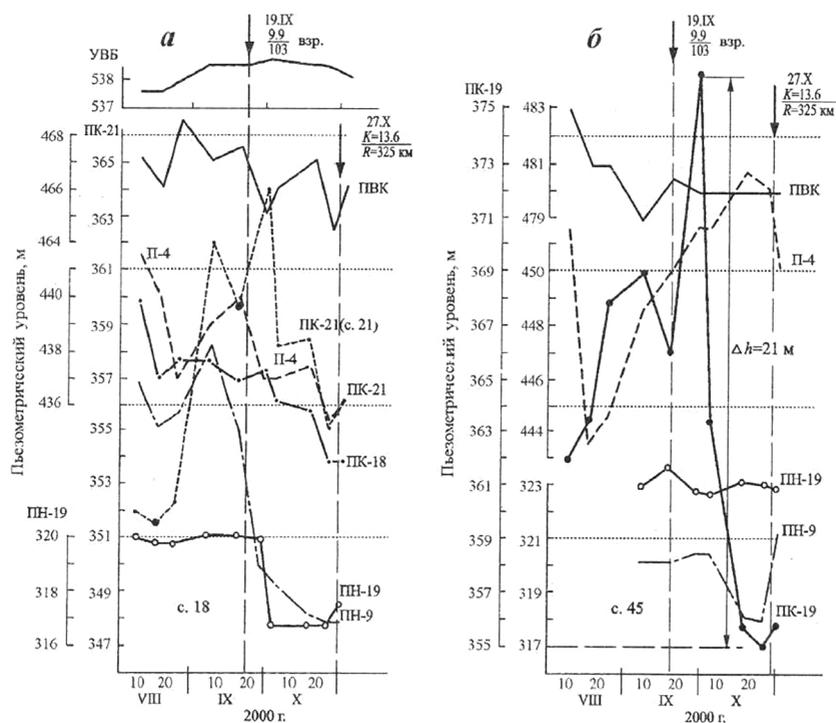


Рис. 52. Краткосрочные ГГД-предвестники Красноярского землетрясения 27 октября 2000 г. в основании плотины Саяно-Шушенской ГЭС:
а – изменения УВБ и показания пьезометров в секциях 18 и 21,
б – показания пьезометров в секции 45

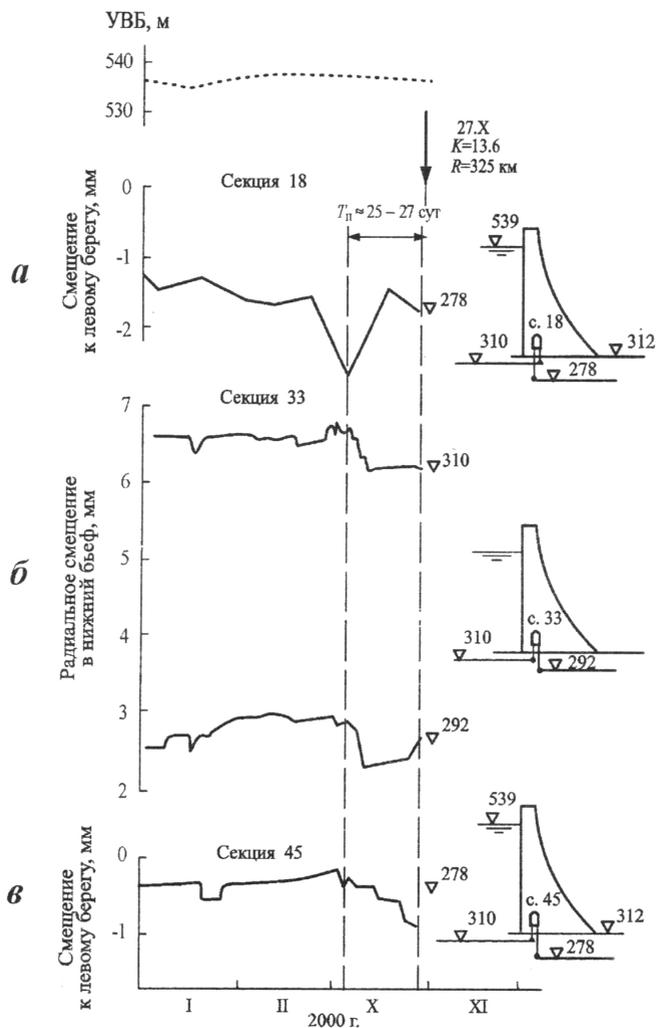


Рис. 53. Показания автоматизированных обратных отвесов в основании секций 18, 33 и 45 плотины Саяно-Шушенской ГЭС в период подготовки Красноярского землетрясения 27 октября 2000 г.:
а – секция 18 тангенциальные смещения на отм. 278 м,
б – секция 33 радиальные смещения на отм. 310 и 292 м,
в – секция 45 тангенциальные смещения на отм. 278 м

за период с 1995 по 2000 г. напряжения увеличились на 1,2–2 МПа. В совокупности с ростом сейсмической активности указанные аномалии могли быть сигналом о накоплении тектонических напряжений, предвестниками ожидаемого сильного землетрясения. В связи с этим в течение января–марта 2001 г. лабораторией гидротехнических сооружений СШ ГЭС по нашей рекомендации были организованы дополнительные наблюдения за изменениями фильтрационного режима. Из-за отсутствия серьезных нарушений режима в марте они, к сожалению, были отменены.

Вопрос о предполагаемом прогнозе сильного землетрясения в марте 2001 г., по нашей инициативе, рассматривался в Центре службы геодинамических наблюдений электроэнергетической отрасли и на заседании Научного совета по проблемам сейсмологии РАН. Было решено запросить дополнительные материалы Алтае-Саянской ОМСЭ по сейсмологическим условиям последнего времени. В марте сейсмичность в приводохранилищном регионе резко возросла, произошли 15 событий энергетического класса $K = 9$ и более вместо одного в марте 2000 г. Пик выделенной сейсмической энергии пришелся на апрель, когда произошло 126 сейсмических событий, в том числе 8 событий с магнитудой $M = 2,9–3,5$ против обычных 27–28 в это же время в прошлые годы (рис. 54). Этот эпизод подтвердил надежность ГГД-предвестников и предположение о том, что глубоководные водохранилища в сейсмичных районах способствуют диссипации накопленной тектонической энергии, которая разряжается большим количеством слабых толчков.

Первое ощутимое сотрясение плотина СШ ГЭС испытала во время Горно-Алтайского землетрясения 27.09.2003 с магнитудой в эпицентре $M = 6,6$ на расстоянии 325 км к юго-востоку от плотины. Это событие предварялось уменьшением фильтрационных расходов по гидроузлу в 2002 г., местным Ермаковским землетрясением энергетического класса $K = 9,4$ на расстоянии 70 км от плотины, появлением кластера эпицентров у села Шушенское. За 40 суток до главного события в дренажной сети секций 12–14 возрос дебит дрен при постоянном УВБ, появились

аномальные флуктуации в показаниях обратных отвесов в с. 18 и 45. Землетрясение интенсивностью сотрясений 4 балла ощущалось на гребне плотины и на верхних этажах домов поселка Черемушки.

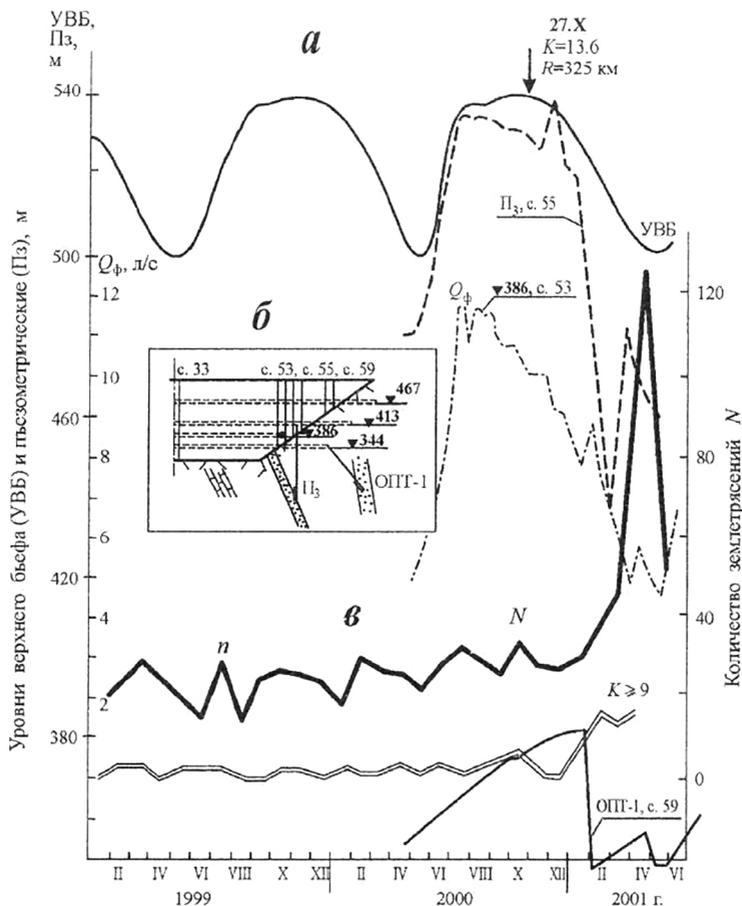


Рис. 54. Повышение сейсмической активности в марте-апреле 2001 г. в районе Саяно-Шушенской ГЭС и ГГД предвестники в зонах тектонических нарушений:
а – изменения УВБ, **б** – схема расположения измерительных точек, **в** – количество сейсмических событий

На СШ ГЭС 17 сентября 2009 г. произошла катастрофа с разрушением и затоплением здания ГЭС. Прямое влияние сейсмике в качестве причины аварии было исключено, поскольку предшествующий период с 2003 г. не отличался сейсмической активностью. Тем не менее геологические и геодинамические аспекты в этом трагическом происшествии играют заметную роль. Время и место очага разрушения не являются случайными. В августе-сентябре достигается наивысший уровень водохранилища, когда останавливается его быстрый рост и открываются водосбросы. Это вызывает упругий отпор породы береговых примыканий с максимальным импульсом со стороны левого берега, где температура массива примерно на 6 градусов выше правобережной из-за инсоляции. Максимальное воздействие этого импульса проявляется в наиболее нагруженной с. 18 у левого берега, за которой расположен аварийный гидроагрегат № 2. Агрегатный блок № 2 расположен на основании, ослабленном тектоническим нарушением П-8, и всегда отличался повышенной вибрацией. Упругий отпор вызвал импульсное возмущение гидравлического режима в турбинном водоводе № 2, который передает напряжения с низовой грани плотины на анкерную опору и спиральную камеру агрегата № 2. Импульсное повышение давления оказалось разрушительным для крепления крышки турбины с усталостными повреждениями металла. Триггерный эффект упругого отпора породы подтверждается скачками пьезометров, дебита дрен в основании с. 18 и записями сейсмостанции «Черемушки» [Марчук А., Марчук Н., 2011].

Значительным сейсмическим нагрузкам гидростанция подверглась в 2011–2012 гг. В этот период в Саяно-Тывинском регионе произошли три сильных землетрясения: Хакасское 10.02.2011 $M = 5,5$ на расстоянии 78 км от СШ ГЭС, Тывинское 27.12.2011 $M = 6,1$ на расстоянии 325 км с двумя афтершоками $M = 4,3$ на расстоянии 271 км, Тывинское 26.02.2012 $M = 6,4$ на расстоянии 330 км с шестью сильными афтершоками, из которых два имели $M = 5$. Хакасское землетрясение предварялось скачкообразным изливом цементационных и дренажных скважин 20 декабря

2010 г. в зоне руслового тектонического нарушения в основании с. 26–32, с увеличением суммарного дебита в 5 раз. Такой высокий дебит держался до февраля 2011 г., а после Хакасского землетрясения постепенно снижался до нормального уровня в мае 2011 г. Оба толчка в Тыве отмечены скачкообразным падением дебита скважин на 20–30 % в основании тех же секций. Контактные пьезометры в основании водосливной плотины, в с. 40 и 48 синхронно с дренажными скважинами отметили предвестниковые аномалии в показаниях, а после землетрясения 10.02.2011 вернулись к нормальным уровням. Прямые и обратные отвесы наиболее явно отметили подготовку и последствия Тывинского землетрясения 27.12.2011 в с. 18 и 45 отклонениями от 0,5 до 5 мм на разных отметках по высоте.

Максимальные приращения арочных напряжений сжатия в бетоне плотины зафиксированы сразу после Хакасского землетрясения у нижней грани левобережной с. 10 на отм. 534 м. Здесь сжатие увеличилось на 0,2 МПа и продолжало повышаться до 28.04.2011 со значения 4,5 до 5,14 МПа при снижении УВБ на 21,5 м. В период первого землетрясения в Тыве 27.12.2011 этот же прибор показал приращение сжатия на 0,13 МПа. Наиболее чувствительными по изменению напряжений в периоды сейсмической активности являются анкерные опоры турбинных водоводов. В оболочке трубопровода гидроагрегата № 4 приращения напряжений с 07.02 до 21.02.2011. составили от 3,5 до 4,8 МПа при снижении УВБ за этот период на 2,3 м.

В 2013 г. был построен и введен в действие береговой водосброс СШ ГЭС (БВС), рассчитанный на пропуск паводковых расходов р. Енисей в размере 4000 куб. м/сек. Это уникальное сооружение при работе генерирует мощность 8 млн квт, является гигантским «вибратором» и существенно изменяет геодинамические характеристики вмещающего правобережного геоблока с примыканием плотины и близко расположенным Кантегирским разломом. БВС рассекает правобережный геоблок, изменяет поле собственных тектонических напряжений в массиве, влияет на примыкание плотины и может активировать разлом.

Имеющаяся по состоянию на 1 января 2015 г. система контроля работы этого сооружения и состояния вмещающего геоблока не соответствует уровню его ответственности, требует совершенствования для глубоких исследований.

По итогам проведенных исследований на плотине СШ ГЭС можно сделать следующие основные выводы:

1. Геодинамическое влияние на плотину проявляется криповым давлением со стороны более высокого правого берега. Оно стимулируется литостатической неравномерностью по берегам, обводнением массива горных пород из водохранилища, высоким уровнем собственных напряжений сжатия по нормали к руслу, сейсмической активностью Борусского разлома, работой водобойного колодца у правого берега и разуплотнением основания плотины в русле со снижением его деформативных свойств. Последствиями этого влияния являются рост напряжений сжатия в плотине в арочном направлении, сокращение хорды плотины, появление вертикальных трещин на напорной грани с. 38 и 48 по границам водобойного колодца, поперечный изгиб секций, признаки надвига на левом берегу. В связи со строительством берегового водосброса этот вывод подлежит проверке. Можно ожидать снижения горизонтальных тектонических напряжений, частично снятых лотком водосброса.

2. В створе плотины имеет место дифференцированная работа берегов, обусловленная наличием руслового разрывного нарушения по литологической границе орто- и парасланцев, потенциальной поверхностью сдвига по тектоническому нарушению П-6,8 на левом берегу, разной степенью сейсмической активности берегов, различием температурных условий (инсоляцией) и конструктивными особенностями плотины. Дифференцированная работа берегов характеризуется различием осадок и горизонтальных смещений по величине и знаку, уровней напряжений береговых упоров, режима фильтрации. Последствиями такого положения является асимметрия НДС арочно-гравитационной плотины, локальная концентрация напряжений в межсекционных швах, образование в них несплошностей и трещин, видимых на стенках галерей береговых частей плотины.

3. Геодинамическое влияние проявляется в неустановившемся гидродинамическом режиме в основании и береговых примыканиях, в пульсации взвешивающего противодействия и высоких градиентов напора, способствующих выносу заполнителя трещин, растворению карбонатных и сульфатных цементов даек и смесителей трещин, прорастанию трещин, снижению деформативных и прочностных свойств пород. В сочетании с постоянной откачкой фильтрационных вод и коллекторными свойствами тектонических трещин в основании плотины это приводит к разуплотнению пород основания, росту осадок, разгрузке собственных напряжений в берегах с ростом арочных напряжений сжатия в плотине. В периоды работы водобойного колодца эти процессы интенсифицируются и охватывают приконтактную зону бетона. Из-за отсутствия дренажа в днище водобойного колодца это усиливает опасность его разрушения при пропуске расчетного паводка. Ремонтные работы по уплотнению основания существенно снижают степень гидрогеодинамического влияния.

4. Землетрясения 14 марта 1994 г., 27 октября 2000 г. и 27 сентября 2003 г. (Алтайское), Хакасское 10.11.2011, Тывинские 27.12.2011 и 26.02.2012 показали, что сейсмические воздействия представляют опасность для потенциально неустойчивых массивов левого берега ближайших к примыканию плотины и расположенных над корпусом управления ГЭС. Состояние и устойчивость этих массивов должны быть под постоянным контролем.

5. Четыре субпараллельных тектонических зоны в основании плотины влияют на ее генеральные смещения: правое крыло плотины имеет тенденцию смещаться в сторону нижнего бьефа, левое – к левому берегу и в верхний бьеф, в зоны пониженных модулей деформации, субпараллельно простиранию тектонических зон.

6. Контроль за геодинамическими воздействиями требует совершенствования измерительных систем СШ ГЭС на Кантегирском разломе, береговом водосбросе, на тектонических зонах по берегам, в потенциально неустойчивых массивах и в зонах трещинообразования в бетоне.

С помощью действующих измерительных систем плотины возможно, и необходимо, организовать службу прогноза землетрясений на территории с радиусом до 500 км, используя для этого мониторинг фильтрационного режима, геохимический анализ, отвесы, контактные деформометры, гидростатические нивелиры, анализ сейсмологических условий и наблюдения на береговом водосбросе и на Кантегирском разломе. Для сейсмологического, сейсмометрического и вибрационного контроля целесообразно установить на плотине инновационную систему ИФЗ РАН, аналогичную работающей на Чиркейской ГЭС.

4.3. Чиркейская и Миатлинская ГЭС

С участием авторов на плотине Чиркейской ГЭС выполнено 5 циклов наблюдений, первые из которых носили рекогносцировочный характер с целью определения комплекса наиболее чувствительных к геодинамическим воздействиям приборов. Последующие циклы были приурочены к периодам активизации сейсмической деятельности в регионе. Главной целью исследований на Чиркейской ГЭС и на других плотинах Сулакского каскада – Миатлинской и Чирюртской (соответственно, 6 и 30 км ниже Чиркейской ГЭС) – была отработка практических инструментальных методов прогноза землетрясений.

Сейсмическая обстановка на Кавказе в конце 80-х – начале 90-х гг. прошлого века характеризовалась усилением активности. В Грузии в 1986 и 1989 г. произошли Джавахетские землетрясения, в 1988 г. Спитакское в Армении, $M = 6,8$, в Грузии Рачинское в 1991 г. с магнитудой $M = 7,1$, Борисахское в 1992 г., $M = 6,5$. Анализ сейсмического режима в Дагестане за период 1992–1995 гг. показал, что общее распределение фоновой сейсмичности неравномерно по площади и во времени, наблюдается некоторое затишье в 1993–1994 гг. Так, общее число землетрясений в 1992 г. составило 263, в 1993 г. – 132, а в 1994 г. – 119. Одновременно отмечалась ежегодная концентрация средних и слабых землетрясений в районе каскада Сулакских ГЭС и Чиркейского гидроузла в частности. По прогнозам ИФЗ РАН 1996 г.

(Славина), наибольшую потенциальную опасность возникновения сильного землетрясения представляют регионы между Дубками и Унцукулем, где расположены Чиркейская и строящаяся Ирганайская ГЭС.

Методика полевых исследований ИФЗ РАН предусматривала обнаружение и идентификацию предвестников землетрясений, гидрогеодинамических, деформационных, температурных путем ежедневных измерений с параллельным контролем сейсмологической обстановки в районе створа плотины сейсмостанцией «Дубки» Дагестанской Опытной-методической сейсмической партии Геофизической службы РАН.

Силами службы природных наблюдений Чиркейской и Миатлинской ГЭС осуществлялись ежедневные измерения фильтрационных расходов, температуры дренажных вод, пьезометрических уровней, показаний прямых и обратных отвесов, струнных телетензометров, деформометров и щелемеров. При этом измерения на Миатлинской ГЭС и Чирюртской ГЭС привлекались как дополнительный контрольный материал для проверки регионального характера исследуемых явлений.

В цикле исследований с 17 октября по 13 ноября 1995 г. измерялись фильтрационные расходы и температура воды в двух коллекторах правого берега, в дренажном лотке левого берега и в пяти дренах на каждом берегу; пьезометрические уровни в тридцати пьезометрах на двух горизонтах (отметки 163 и 220 м) и в шести пьезометрах на отметке 330 м; снимались показания 110 струнных деформометров на верхних отметках (330 и 315 м) Чиркейской плотины. На Миатлинской ГЭС измерялись фильтрационные расходы и температура дренажных вод в двух источниках на левом и правом берегах, уровни в двадцати пьезометрах, показания прямого отвеса и 320 струнных датчиков.

Предвестниковые сигналы выделялись как аномалии на фоне нормальных зависимостей измеряемых параметров от УВБ. Так, аномальный рост фильтрационных расходов в контрольных коллекторах и дренах Чиркейской плотины при снижающемся УВБ в период 20–23 октября 1995 г. был признан предвестником зем-

летрясения (рис. 54). Примерно в это же время, 23–24 октября, резко изменился тренд графиков отвеса по обеим осям координат на Миатлинской плотине, а 19 октября обозначился перелом в графиках фильтрационных расходов в береговых примыканиях этой плотины.

После всестороннего анализа предвестников и сейсмологической обстановки предшествующих дней в качестве стартовой точки отсчета прогнозного времени было выбрано 23 октября 1995 г. — средняя дата перелома большинства графиков. Прогнозный интервал времени от точки перелома (23.10.1995) до ожидаемого толчка определялся по аналогам из ретроспективного ряда наблюдений. Поскольку на Чиркейской ГЭС отсутствует статистическая обработка ретроспективного ряда за весь период наблюдений (1974–1995 гг.), прогнозный интервал определялся тремя способами:

— по многолетним наблюдениям института «Гидроспецпроект» за фильтрационным режимом октября–ноября в первый период наполнения водохранилища, совмещенным с каталогом сейсмических событий за период 1974–1980 гг.;

— по региональному каталогу для октября–ноября за период 1990–1994 гг. с вычислением среднестатистического времени между двумя толчками $K = 8$;

— по каталогу для октября–ноября за тот же период с вычислением среднестатистического времени между форшоком и толчком $K = 12–13$.

По всем трем методам прогнозный срок определился в 8 суток. Поскольку измерения фильтрационных расходов «Гидроспецпроект» проводились в большинстве случаев не ежедневно, а один раз в 2–3 дня, в прогноз была введена поправка ± 1 сут. Справка о прогнозе 23 октября была официально выдана директору и главному инженеру Чиркейской ГЭС.

Для контроля за достоверностью прогноза с 25 октября осуществлялся ежедневный замер фильтрационных расходов, почасовой отчет показаний самого глубокого обратного отвеса ОО-5 в ключевой секции плотины (рис. 55, в). По данным сейсмостанции «Дубки» 28 и 29 октября 1995 г. были зафиксированы дальние

толчки энергетического класса $K = 9,5$; $R = 137$ км и $K = 10,1$; $R = 300$ км; отмечены также флуктуации графиков по осям X и Y , но которые на ГЭС не ощущались. 30 и 31 октября сеймостанцией «Дубки» было зафиксировано два близких толчка в глубокой части водохранилища ближе к его правому берегу на расстоянии 8 и 10 км от плотины, четко отмеченных обратным отвесом ОО-5; 1 и 2 ноября отклонением до 1,7 мм по оси Y к правому берегу и 0,71 мм в сторону верхнего бьефа (рис. 55). Судя по этой деформации приконтактной зоны плотины, прогноз можно считать оправдавшимся. Это подтверждается также показаниями отвеса на плотине Миатлинской ГЭС и изменениями дебита дрен в береговых примыканиях Миатлинской плотины. Закладные струнные телетензометры в бетоне плотины за редким исключением практически не отреагировали на сотрясения такой малой интенсивности.

В связи с тем что в период высокого уровня водохранилища в 1995 г. глубокой разрядки тектонических напряжений не произошло и дефицит событий энергетического класса $K \geq 12$ продолжал сохраняться, было принято решение провести второй цикл исследований в период сработки водохранилища, при горизонте мертвого объема в 1996 г.

Ежедневные измерения пьезометрических уровней, фильтрационных расходов; отклонений в показаниях отвесов ОО-1, ОО-5, и ОО-6 и телетензометров, заложенных в бетон и в скалу береговых примыканий, проводились с 10 по 25 апреля 1996 г. Из-за маловодности года, отсутствия снеговых запасов в горах, УВБ Чиркейского водохранилища изменялся в этот период незначительно, в пределах 10–20 см. Один, реже два гидроагрегата Чиркейской ГЭС включались в работу только в часы утреннего и вечернего пика нагрузки; в результате уровень водохранилища сохранялся практически постоянным, в среднем на отм. 315,10 м, на протяжении всего периода наблюдений. В этот период, с 05.04 по 23.04.1996, сеймостанцией «Дубки» зафиксированы следующие сейсмические события (табл. 14).

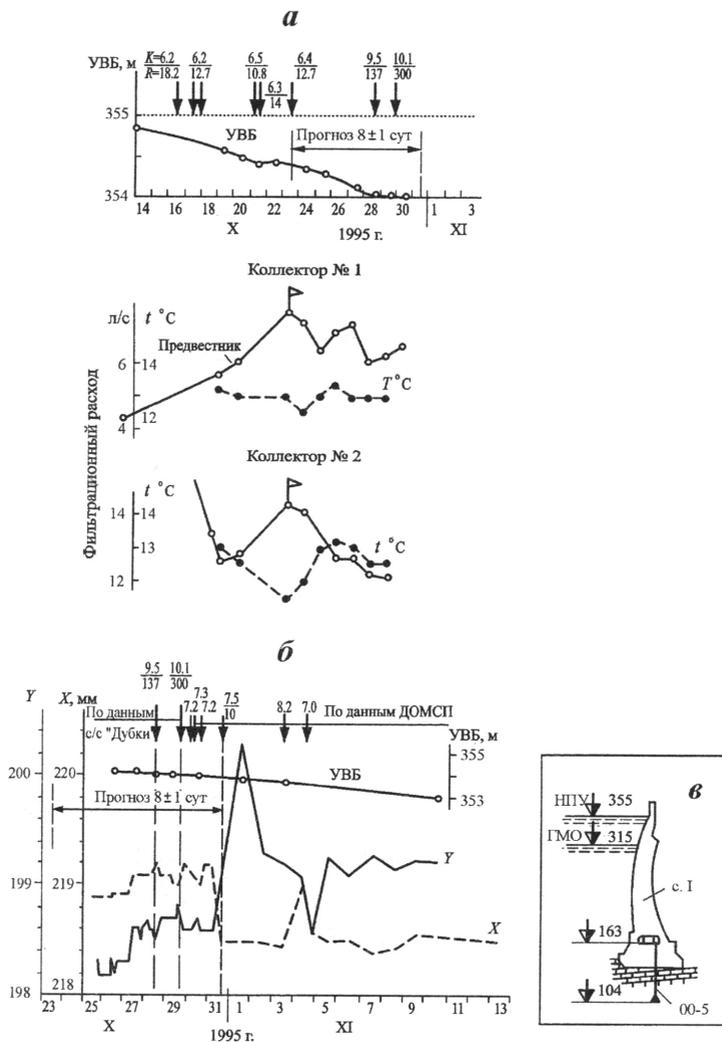


Рис. 55. Отклик дренажной системы и обратного отвеса ОО-5 в основании плотины Чиркейской ГЭС на сейсмические события: *a* – изменения фильтрационных расходов и температуры дренажных вод в коллекторах правого берега, *б* – показания обратного отвеса ОО-5 по осям *X* (по течению) и *Y* (поперек течения), *в* – схема расположения ОО-5 в ключевой секции плотины

**Сейсмические события в районе створа Чиркейской ГЭС
в апреле 1996 г.**

Дата	Время по Гринвичу	Энергетический класс К	Расстояние от плотины Чиркейской ГЭС до эпицентра R, км	Примечание
05.04.1996	—	6,9	18,7	
10.04.1996	11:40	9,2	93	
14.04.1996	22:00	5,1	10,2	
18.04.1996	00:20	4	Не определено	
20.04.1996	04:24	10,1	140	
22.04.1996	14:43	11,4	12,3	Прогнозировалось 14.04.1996
23.04.1996	01:29	7,7	55,7	

События 20.04 и 22.04.96 имели предвестники в виде увеличения фильтрационных расходов в коллекторах № 1, 2 при постоянном УВБ; повышения температуры дренажных вод с 12 °С до 13 °С; изменения тренда графиков показаний обратных отвесов ОО-1 и ОО-6, наиболее ярко выраженных у левобережного отвеса ОО-6 (рис. 56).

По указанным предвестникам и ретроспективному анализу графиков фильтрационных расходов института «Гидроспецпроект», построенных в первые годы эксплуатации водохранилища, был составлен прогноз ожидаемого времени очередного толчка. Предвестники были идентифицированы 14 апреля, прогнозный срок определился в 6 суток, ожидаемое время толчка было назначено на 20 апреля. Прогноз оправдался, на что был составлен соответствующий акт.

На плотине Миатлинской ГЭС фильтрационные расходы, показания пьезометров и телетензометров в бетоне обнаруживают высокую степень корреляции с УВБ, который изменялся с размахом до 3 м, затруднявшим выделение геодинамического влияния. Тем не менее в показаниях прямого отвеса можно выделить

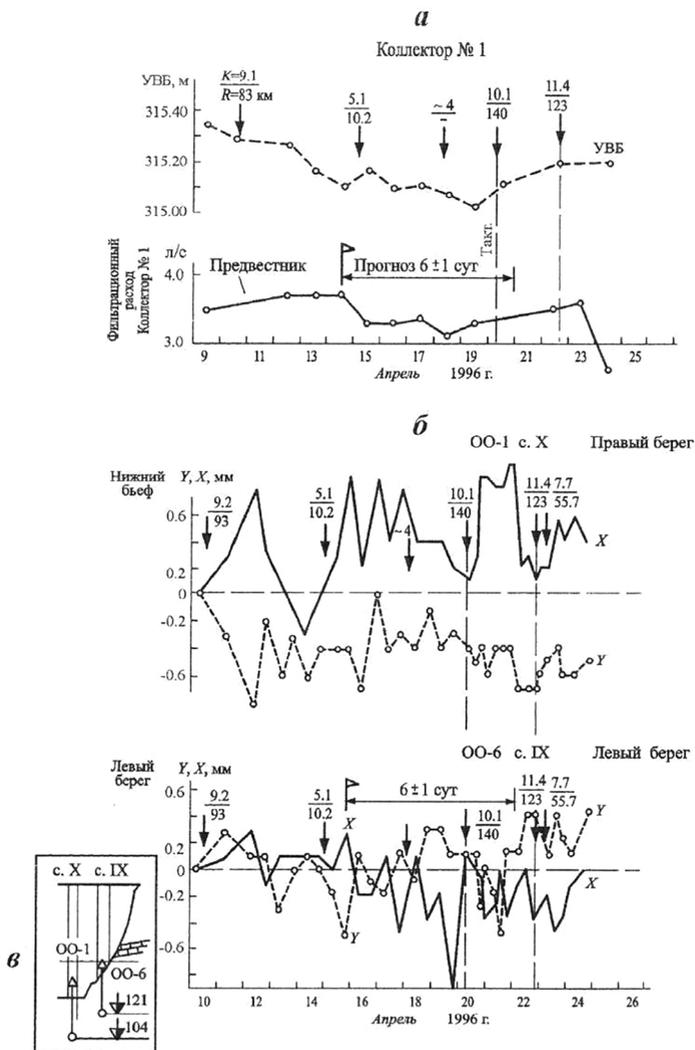


Рис. 5б. Отклик обратных отсегов ОО-1 и ОО-6 и расходов в коллекторе № 1 на сейсмические события: **а** — расходы в коллекторах нисходящего дренажа, **б** — показания обратных отсегов в ключевой секции и у левого берега, **в** — схема размещения отсегов

переломы графика по оси Y поперек течения 20 и 23 апреля, совпадающие с толчками энергетического класса соответственно $K = 10,1; 11,4; 7,7$. Можно также предположить, что местный слабый толчок $K = 5,1$, отмеченный 14 апреля, мог быть спровоцирован резким снижением УВБ Миатлинского водохранилища почти на 2 м за одни сутки.

В соответствии с долгосрочным прогнозом ИФЗ РАН 1995 г., составленным Л. Б. Славиной, в районе расположения каскада Сулакских ГЭС 31 января и 21 февраля 1999 г. произошли землетрясения энергетического класса соответственно $K = 14,8$ и $K = 13,5$ с магнитудой до $M = 5,6$ и интенсивностью сотрясения до 6 баллов. Значительные повреждения получили жилые и общественные здания и коммуникации в поселках Кизилюрт, Кульзеб, Чирюрт, Миатли. Активная афтершоковая деятельность очагов продолжалась до 2001 г. Эпицентр землетрясения 31 января 1999 г. располагался в 20 км севернее Чиркейской ГЭС в нижнем бьефе на правом берегу, а 21 февраля – в 10 км на левом.

В период с 10 марта по 2 апреля А. Н. Марчуком совместно со службами натурных наблюдений Чиркейской и Миатлинской ГЭС проведены исследования реакций плотин и вмещающих массивов горных пород на подготовительный период землетрясений и их последствия. В этот же период осуществлялся оперативный прогноз сильных афтершоков, изучался отклик измерительных систем плотин на сейсмогенные воздействия. Целью исследований были определение реакции измерительных систем плотин на подготовительный период землетрясений, оценка состояния сооружения после перенесенных землетрясений и изучение возможностей прогнозирования опасных повторных толчков.

Ретроспективным анализом результатов штатных натурных наблюдений непосредственно перед землетрясениями было установлено, что измерительные системы плотин фиксировали появление и развитие предвестников события 31 января 1999 г. Наиболее узнаваемыми были гидрогеодинамические предвестники,

проявившиеся в наблюдениях за фильтрационным режимом. Так, на Чиркейской плотине в середине октября 1998 г. при максимальном и постоянном УВБ на отметке 353 м снизился суммарный фильтрационный расход с 34,5 до 29 л/с, а после форшоков в октябре и декабре – до 26 л/с (рис. 57). В пьезометрах, расположенных в зоне влияния крупных тектонических трещин № 150 и 815, в декабре 1998 г. и январе 1999 г. при снижении УВБ аномально повысился, а затем резко снизился на 3–4 м пьезометрический уровень. В декабре обозначилась резкая асимметрия в смещении створных пунктов на гребне плотины. В конце января появились приращения в показаниях отвесов до 2,4 мм (с. 1), до 2,5 мм (с. IX), более 1 мм (с. X), которые являются аномальными (рис. 58) На Миатлинской плотине наблюдалась непривычно высокая температура дренажных вод – на 3–5 °С выше обычной для зимнего периода; при постоянном УВБ в пределах 151,7–152,2 м и в ряде источников отмечался высокий дебит дренажных вод (рис. 59). На сооружениях Чирюртовского гидроузла при постоянном УВБ 95,20–95,69 м отмечены подъемы

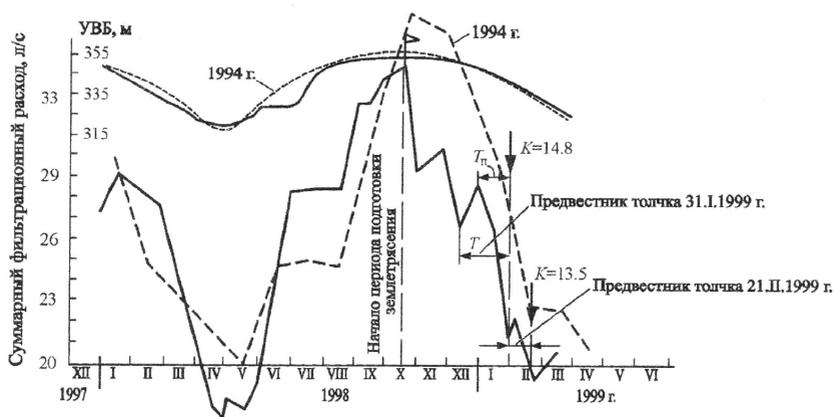


Рис. 57. Аномалии в графике фильтрационных расходов через основание Чиркейской ГЭС перед землетрясениями 31.01 и 21.02.1999. Пунктиром показан нормальный среднегодовой ход УВБ и фильтрационных расходов в 1994 г.

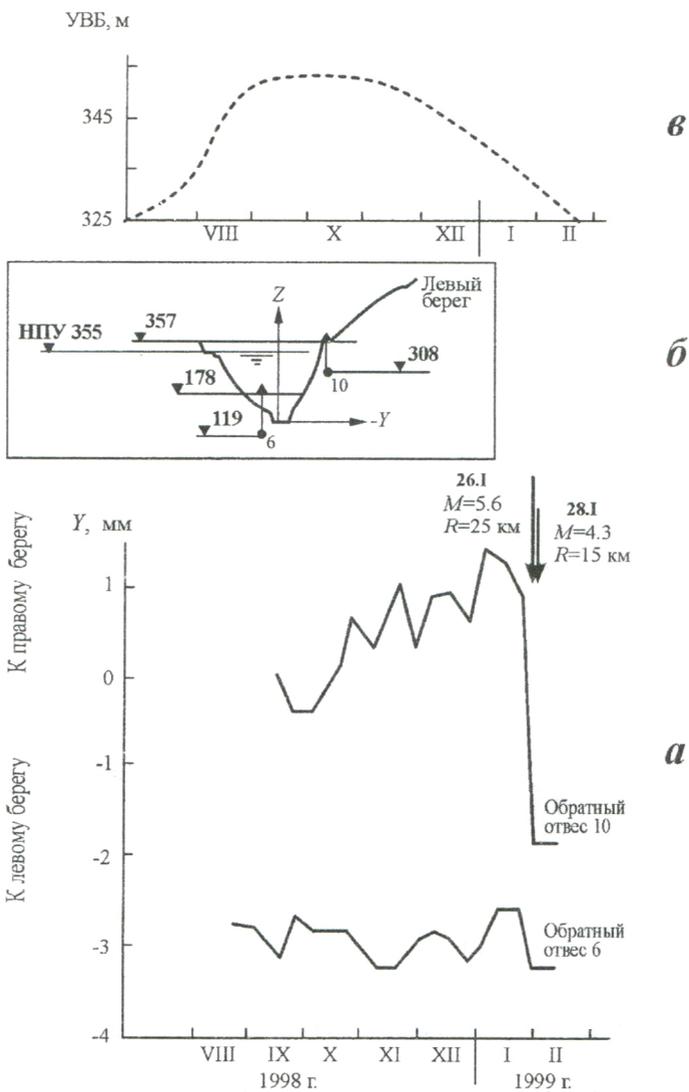


Рис. 58. Реакция обратных отвесов (а) плотины Чиркейской ГЭС на землетрясения 31.01.1999 и 21.02.1999, схема их расположения (б), изменения УВБ (в)

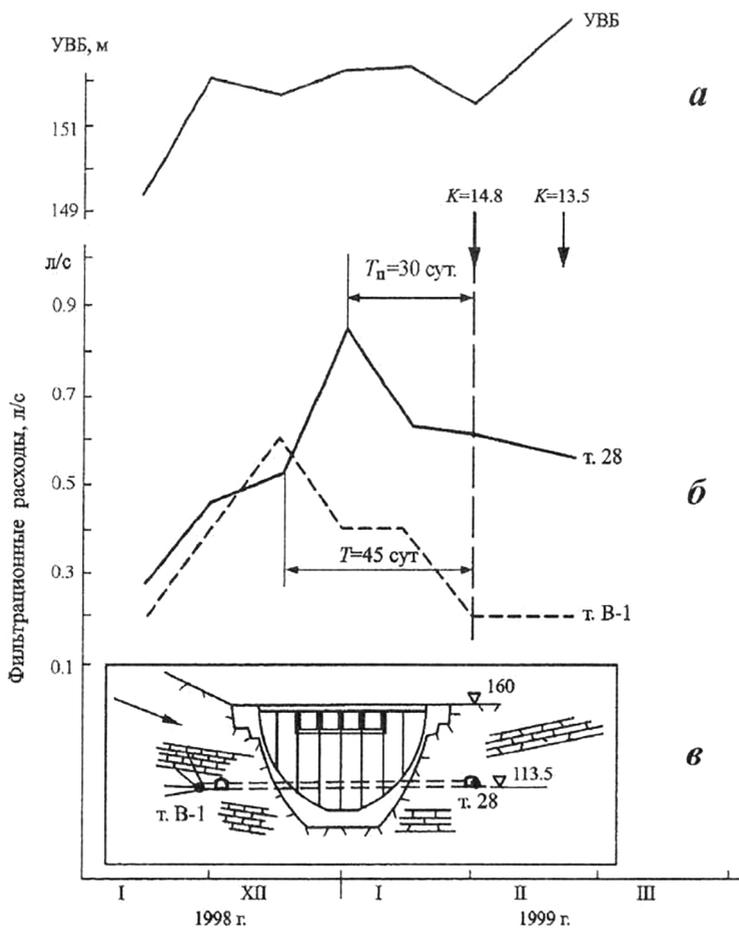


Рис. 59. Реакция дебита дрен плотины Миатлинской ГЭС на подготовку землетрясений 31 января и 21 февраля 1999 г.: а – изменения УВБ, б – дебит дрен в т. В-1 на правом берегу и в т. 28 на левом берегу, в – схема размещения измерительных точек. Стрелкой показано направление крипа со стороны оползневого правобережного склона

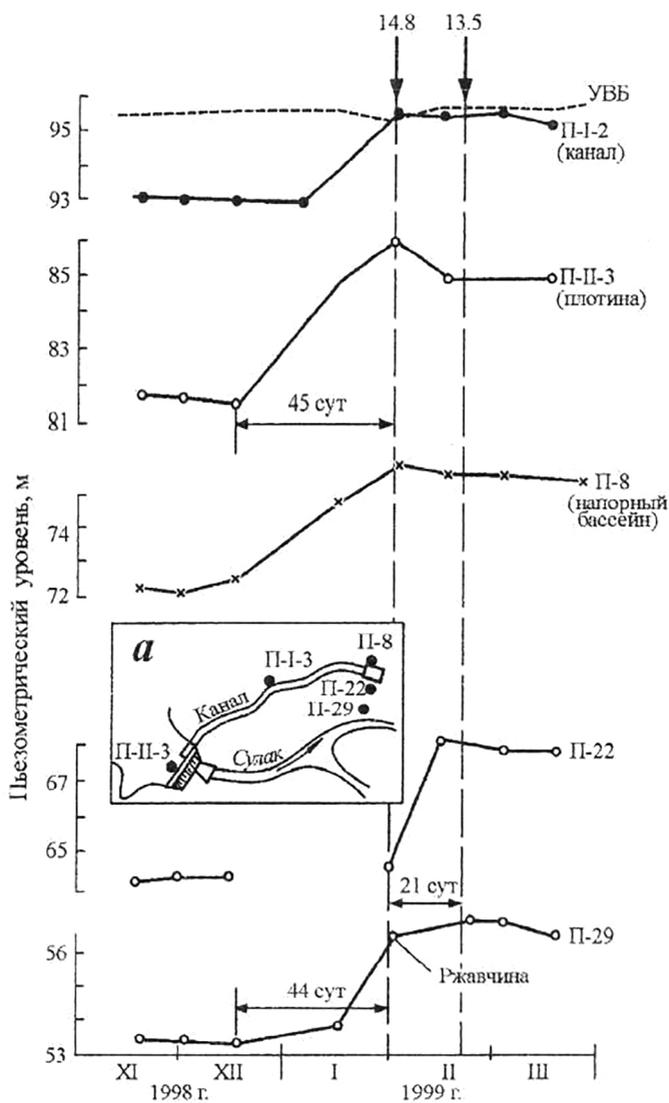


Рис. 60. Отклик пьезометров Чириуртовского гидроузла на подготовительный период землетрясения 31 января 1999 г.
a – схема расположения пьезометров

пъезометрических уровней за 45–30 сут. перед толчком 31.01.1999 в пьезометрах плотины, канала и напорного бассейна (рис. 60).

Геодезические знаки на разломе Калудалкал, который представляет собой сбросо-сдвиг, в нижнем бьефе Чиркейской ГЭС показывали длительное, в течение 3 лет, постоянно нарастающее сжатие и сдвиг между бортами разлома. Таким образом, можно обоснованно констатировать, что измерительные системы плотин реагировали на неотектонические движения и подготовку сильного землетрясения.

Гидротехнические сооружения ГЭС Сулакского каскада перенесли оба землетрясения без существенного ущерба. Этому способствовали пониженные уровни водохранилища и теплая зима, когда бетон сооружений был сжат. Наиболее значительными были повреждения облицовки деривационного канала Чирюртской ГЭС, которая была быстро восстановлена. Появилась трещина вдоль парапета на гребне земляной плотины Чирюртской ГЭС (грунтовая плотина высотой 38 м, длиной по гребню 430 м), но значительно меньших размеров, чем во время землетрясения 14 мая 1970 г. На Чиркейской плотине при УВБ на 17 м ниже НПУ «пошевевелились» межсекционные швы на величину до 1 мм у гребня, до 0,55 мм в средней части плотины и до 0,1 мм у пробки. По показаниям прямых отвесов до и после землетрясения следует, что основной формой импульсной упругой деформации плотины было сжатие между берегами с толчком ключевой секции в верхний бьеф на 2,4 мм на отметке 315 м, на 1,4 мм на отметках 178 и 220 м. При этом смещение в тангенциальном направлении «правый–левый берег» было направлено по косой линии от отметки 357 м на левом берегу – 0,9 мм к отметке 220 м, на правом – 1,4 мм.

Наблюдение за маяками на трещинах в зоне крепления левобережного откоса показало, что 3 из 14 пунктов показали полное смыкание трещин, 7 – раскрытие до 0,8 мм, 4 маяка не изменили своих показаний. Что касается напряженного состояния плотины, то из-за перерыва в наблюдениях охарактеризовать его изменения не представляется возможным. Можно только отметить,

что в периоды наивысшего УВБ 353 м в 1998 г. напряжения в самом нагруженном месте низовой грани секции X на отметке 240 м были на 0,3 МПа выше, чем при УВБ 355 м в 1990 г. Имеются трещины у правобережного примыкания низовой грани между отметками 197–210 м, но появились они в основном до землетрясения как результат крипового давления со стороны левого берега. Наблюдались вывалы камней со стенок подходных штолен. При этом своды всех штолен, укрепленные торкрет-бетоном и анкерровкой, не повреждены. Марки на левобережном откосе, над потенциально неустойчивым массивом № 16, показали в первой декаде декабря 1998 г. осадку по сравнению с июнем до 12 мм (марка 4), а после толчков осадка увеличилась незначительно – до 3 мм.

На Миатлинской ГЭС произошло обрушение породы объемом 15 м³ у входа в вентиляционную штольню. Дистанционная КИА в плотине не показала существенных изменений после толчков 31.01 и 21.02.1999. Геодезическими наблюдениями отмечена активизация правобережного оползня. Горизонтальные его смещения увеличились на 64 см, осадки – на 67 см, скорость движения временно возросла до 9 мм/сут. В целом вмещающие горные породы вызывают больше тревоги, чем состояние гидротехнических сооружений. Многочисленные слабые землетрясения в сочетании с дождями могут создать условия для активного движения оползней и обрушений. В марте-апреле дренажные воды имели заметную мутность, как и весь Сулак в нижнем бьефе Чиркейской ГЭС, что означает разжижение и вынос тонкодисперсных частиц из глинистых прослоек карбонатных пород основания.

Главной целью исследований в период с 10 марта по 2 апреля 1999 г. был оперативный прогноз сильных опасных афтершоков с помощью измерительных систем плотин. При этом из большого числа афтершоков, до 10 и более в сутки, необходимо было выделить самые сильные, представляющие реальную опасность. В качестве таковых были приняты землетрясения энергетического класса $K > 10$, дающие ощутимые сотрясения интенсивно-

стью не менее 3–4 баллов. На Чиркейской и Миатлинской ГЭС были организованы ежедневные наблюдения шести контрольных параметров по группе наиболее чувствительных к геодинамике средств измерений. Подлежали контролю:

- фильтрационные расходы в коллекторах № 1 и 2 на отм. 163 м правого берега Чиркейской плотины. Эти коллекторы собирали, соответственно, дебит восходящих и нисходящих скважин;

- дебит четырех контрольных дрен на обоих берегах Чиркейской плотины и семи источников на разных берегах Миатлинской плотины;

- температура фильтрационных и дренажных вод во всех указанных коллекторах и источниках;

- показания 14 контрольных пьезометров на отм. 220 м в штольнях Чиркейской плотины и 16 пьезометров на разных отметках в штольнях Миатлинской ГЭС;

- показания трех обратных отвесов на Чиркейской плотине, одного прямого и одного обратного отвеса на Миатлинской ГЭС;

- контроль дистанционной КИА по шести коммутаторам на Чиркейской и восьми коммутаторам на Миатлинской плотинах, всего около 300 струнных преобразователей различного назначения;

- сейсмометрические данные службы сейсмоконтроля Чиркейской ГЭС и сейсмостанции «Дубки» ДОМСП.

Фиксировались также суточный график нагрузки Чиркейской ГЭС, время включения и выключения гидроагрегатов, температура наружного воздуха, уровни водохранилища и объемы сработки. Каждый прогноз с соответствующим обоснованием в докладной записке вручался директору Чиркейской ГЭС до сейсмического события.

Наиболее информативными оказались гидрогеодинамические предвестники в коллекторе № 2 (рис. 61), обратные отвесы Чиркейской плотины и термометрия дренажных вод Миатлинской ГЭС. Остальные данные играли вспомогательную роль для идентификации и контроля. За период с 12 по 30 марта 1999 г.

было сделано четыре подряд прогноза ожидаемых землетрясений (сильных афтершоков), которые по датам полностью оправдались. Неточности были в определении энергетического класса событий: 18 марта предсказывался толчок $K = 9-10$. Фактически по оперативным данным сейсмостанции «Дубки» было два толчка: один $K = 10,8$, второй $K = 10$. 20 марта предсказывался толчок $K = 10-11$, фактически был один толчок $K = 10,5$, прогноз оказался успешным. 26 марта по прогнозу ожидалось землетрясение $K = 10,5-11$, фактически был один толчок $K = 9,8$ на расстоянии 15 км и два толчка $K = 10...10,1$ на расстоянии 200 км от плотины. 29 марта прогнозировался толчок $K = 10$, фактически имели место два события $K = 10,2$ и $K = 10,4$. Толчки 24 и 26 марта подтверждены откликами отвесов Миатлинской ГЭС (рис. 62).

Отметим, что в характере распределения афтершоков во времени и миграции эпицентров значительную роль играли и техногенные факторы. Максимумы в количестве толчков по часам суток совпадали с максимумами электрической нагрузки на Чиркейской ГЭС. Значительное число толчков в сутках «срывалось» во время утреннего включения первого агрегата после ночного простоя ГЭС. Наблюдалось также «стягивание» эпицентров к плотине по мере сработки водохранилища, отмечавшееся ранее при изучении возбужденной сейсмичности в районе Зейской и Нурукской ГЭС. Сильные афтершоки совпадали по времени с периодами снижения атмосферного давления и температуры воздуха, с осадками в виде снега и дождя.

После описанного эксперимента по оперативному прогнозированию руководством Чиркейской ГЭС было принято решение по учащенному измерению фильтрационных расходов (4 раза в неделю). Эта работа продолжалась 2 года, был накоплен значительный статистический материал для выявления зависимостей между изменениями фильтрационных расходов и параметрами ожидаемых землетрясений. Как и следовало ожидать, точность контроля фильтрационных расходов в коллекторах существенно повысилась, увеличились пиковые значения флуктуаций. Двухлетний ряд подробных наблюдений, проанализированный совместно

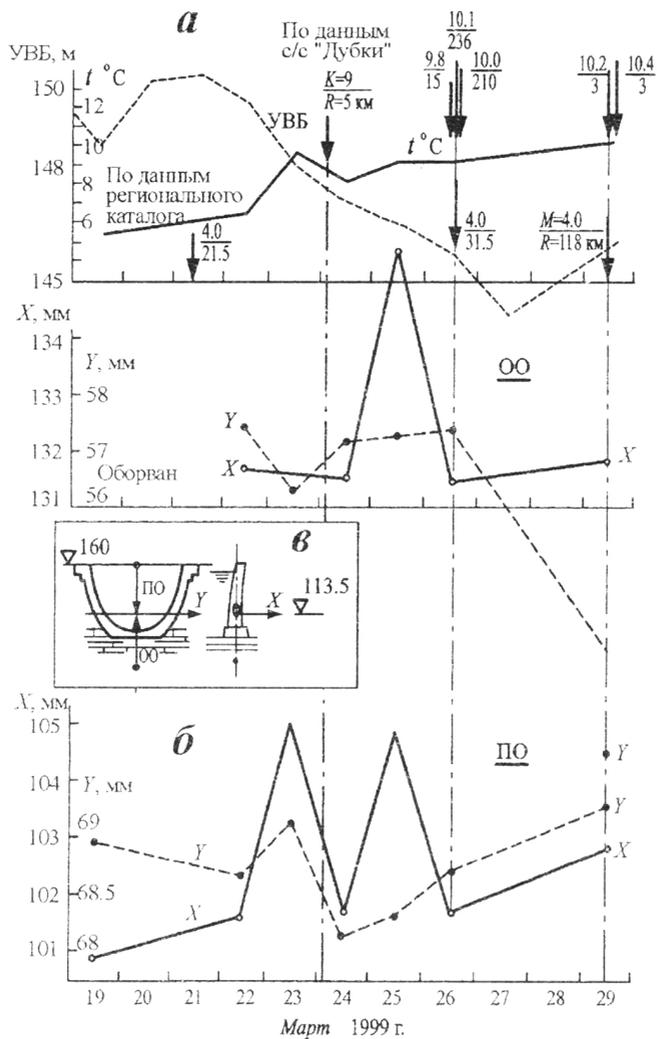


Рис. 62. Отклик отвесов Миатлинской плотины на изменения УВБ, температуры воздуха и сейсмические события:
 а – изменения УВБ и температуры,
 б – показания отвесов и схема их расположения



МИНИСТЕРСТВО ТОПЛИВА И ЭНЕРГЕТИКИ РФ
Открытое Акционерное общество
Энергетики и электрификации Дагестана
«ДАГЭНЕРГО»

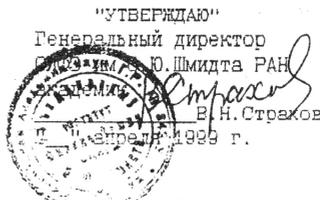
ЧИРКЕЙСКАЯ ГЭС

368117, РД, Кизилорт, п. Дубки тел: 3-59
Р/счет: № 4060281080000000000 БИК 048209922, ИНН 054601194, К/С № 30101810800000000964
КБ «Дагэнергобанк» Дагестанский Энергетический г. Махачкала

№ _____
на № _____



Генеральный директор
«Дагэнерго»
Г.М.Гамаатов
27 марта 1999 г.



«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
Ю.Шмидта РАН
В.Н.Страков
27 марта 1999 г.

А К Т

**о результатах оперативного прогноза землетрясений
в районе Сулакского каскада ГЭС.**

31 марта 1999г.

пос. Дубки
г.Махачкала

В период с 12 марта по 2 апреля главным научным сотрудником ОИЭС, д.т.н. Марчуком А.Н. совместно со службами натурных наблюдений Чиркейской и Миатлинской ГЭС осуществлялось оперативное прогнозирование с целью выявления подготовки ^{случаев} ударных сейсмических событий 31 января и 21 февраля 1999 года.

Для выявления комплекса предвестников использовались измерительные системы плотин - дренажная сеть, пьезометры, прямые и обратные отводы, дистанционная КИА, гидротермические измерения и сейсмометрические данные с/с "Дубки" в масштабе, близком к реальному времени.

В результате проведенных исследований правильно предсказаны даты толчков 18, 20, 26 и 29 марта. В двух случаях отмечены неточности в определении энергетического класса событий: 18 марта вместо предполагаемого K=12-12,5 фактически имели место 2 толчка K=10,8 и K=10. 26 марта вместо K=11 имел место один толчок K=9,8 на расстоянии 15 км, K=10,1 и K=10,0 на расстояниях соответственно 236 и 210 км.

Результаты работы в целом оцениваются положительно.

Директор Чиркейской ГЭС

А.Р.Абакаров А.Р.Абакаров

Гл.н.с.ОИЭС, д.т.н.

А.Н.Марчук А.Н.Марчук
29.03.99

Нач-к о/с "Дубки"

Ж.И.Балина Ж.И.Балина

с каталогом сейсмостанции «Дубки» и региональным каталогом ДОМСП позволил построить графики зависимостей времени появления предвестника T , а также прогнозного времени $T_{\text{п}}$ от магнитуды, расстояния до эпицентра, глубины гипоцентра, размеров предвестника ожидаемого землетрясения. Достаточно надежная корреляция была обнаружена только для близких к плотине землетрясений в интервале $R = 5-10$ км (рис. 63). Закономерных зависимостей времени появления предвестника от эпицентрального расстояния, глубины гипоцентра не обнаружено. Связь между величиной (амплитудой) предвестника и магнитудой ожидаемого землетрясения оказалась слабой, с коэффициентом корреляции около 0,6.

Очередной цикл наблюдений на Чиркейской и Миатлинской ГЭС с участием эксплуатационного персонала выполнен в период с 7 по 17 сентября 2005 г. После пятилетнего перерыва измеренные смещения в разломе Калудалкал показали увеличение

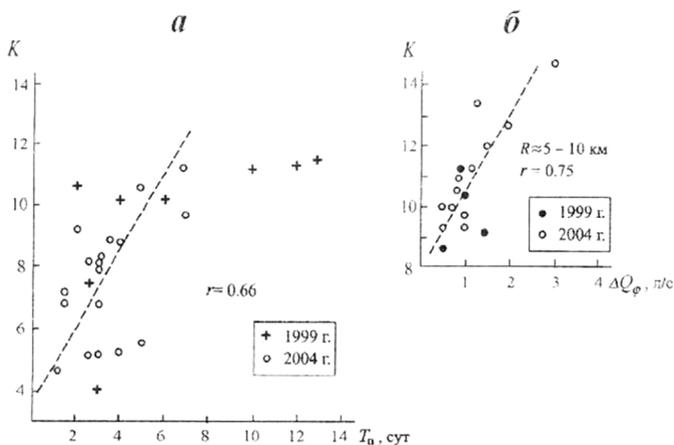


Рис. 63. Корреляционная связь прогнозного времени $T_{\text{п}}$ с энергетическим классом перенесенных землетрясений (а) и корреляция аномальных флуктуаций фильтрационных расходов с энергией близких землетрясений (б) в коллекторе № 2 Чиркейской плотины

скорости смещений в 2004–2005 гг. до 3 мм/год вместо, средне-многолетнего значения 0,3 мм/год. Отмечен рост сейсмической активности в районе створа Чиркейской ГЭС, причем, по наблюдениям, на плотине он почти в 4 раза выше, чем по данным сейсмостанции «Дубки». Возможно, это объясняется удаленностью сейсмостанции на 7 км, разностью высот в 500 м и экранирующей ролью разлома Калудалкал. Продолжается тенденция увеличения арочного сжатия на низовой грани плотины (на 1 МПа по сравнению с 2000 г.), как это следует из отчета ВНИИГ, и роста фильтрационных расходов по правому берегу. Несмотря на выполненную цементацию, по правому берегу проходит более 90 % суммарного фильтрационного расхода.

На Миатлинской ГЭС продолжается движение правобережного оползня. За апрель-июнь 2005 г. он сполз еще на 44 см и осел на 30 см. Суточная скорость за указанные месяцы возросла до 3–6 мм против среднегодовых 0,5–1,5 мм. В пределах верхней части оползня, между отм. 153,5 и 156 м, наблюдается активная фильтрация с выносом твердых частиц в нижний бьеф, что заставляет ограничивать напор на плотину с уменьшением выработки электроэнергии.

Оперативные измерения параметров фильтрационного режима 8, 12 и 14 сентября 2005 г. на трех ГЭС показали синхронность отклика дренажных измерительных систем плотин Чиркейской, Миатлинской и Чирюртской ГЭС на сейсмические события 8, 11 и 13 сентября 2005 г. энергетического класса соответственно $K = 5,5$, $R = 9,5$ и $K = 9,2$, $R = 95$ км. По результатам наблюдений 2004 и 2005 г. проверена надежность и устойчивость во времени ранее полученных корреляционных связей ГГД-предвестников в коллекторе № 2 Чиркейской ГЭС по сравнению с данными 1999 г. Совпадения можно признать удовлетворительными, особенно для малых эпицентральных расстояний – 5–10 км. [Марчук Н., 2006].

В 2005 г. было отмечено увеличение скорости смещения в разломе Калудалкал в 10 раз, подобно тому, как это было за год до землетрясения 1999 г. Было решено чаще контролировать

смещения в этом разломе в качестве долговременного предвестника. За период 2005–2006 гг. интенсивность движения была в три раза выше по сравнению со среднемноголетней. В 2007 г. возросла сейсмическая активность в регионе, отношение скоростей продольных и поперечных волн возросло с нормального значения 1,75 до 1,90. За март-июнь 2008 г. подвижка в разломе составила 8 мм, в сентябре 2008 г. движение в разломе прекратилось, что можно было понимать как консолидацию перед срывом напряжений. Предположение подтвердилось и другими предвестниками. В августе 2008 г. в основании Чиркейской и Миатлинской ГЭС отмечен аномальный рост температуры дренажных вод до 14 и 16 градусов соответственно. Отвес ОО-10 отклонился от нормального положения максимально на 3 мм. Ретроспективный анализ показал, что аналогичные предвестниковые сигналы наблюдались перед Черногорским 28.12.1976 $M = 6,4$ и Кизилюртовским землетрясениями 31.02.1999, $M = 5,6$, за 40–50 суток до толчка. Авторами с выездом на место и дополнительными исследованиями прогноз времени ожидаемого землетрясения с магнитудой $M = 5–6$ был уточнен и доложен 25 сентября на совещании в Дагестанском филиале ОАО «РусГИДРО». Прогноз на октябрь 2008 г. оправдался 11 октября 2008 г. Курчалойским землетрясением $M = 5,6$ на расстоянии 80 км от плотины Чиркейской ГЭС в приграничном районе Чечни, где погибли 7 человек [Марчук А., Марчук Н., 2008].

Исследованиями 2013 г. по разлому Калудалкал [Курахмаев, Гаджимурадова] и анализу сейсмической активности [Даниялов, Рогожин, Славина, 2013], штатных измерений на плотинах, сотрудниками ИФЗ сделан прогноз на сильное землетрясение в сентябре 2013 г. с сообщением в МЧС. Ожидаемое землетрясение произошло 17 сентября 2013 г. Интенсивность сотрясений до 6 баллов ощущалось в 34 населенных пунктах на границе с Грузией. Анализ сейсмограмм, сделанных на плотине экспериментальной инновационной сейсмометрической системой [Гамзатов, Баксараев, Капустян, 2014], позволил по сопоставлению максимальных амплитуд смещений в береговых примыканиях

плотины определить резкую неравномерность деформативности береговых упоров. Смещения на правом берегу оказались в 19 раз больше, чем на левом.

Длительные наблюдения на Чиркейской плотине за показаниями обратных отвесов и изменениями фильтрационного режима в увязке с результатами сейсмометрических наблюдений позволяют сделать следующие важные выводы:

1. Деформации приконтактной зоны основания плотины практически не зависят от гидростатической нагрузки и слабо изменяющейся температуры. Их флуктуации носят случайный характер и по времени соответствуют периодам сильных и близких сейсмических событий. Геодинамическому влиянию подвержен левобережный отвес ОО-10, расположенный на высоких отметках, в потенциально оползневом склоне. Этот отвес наиболее чувствителен к сейсмическим событиям и работе водосброса. Наибольшей активностью и размахами флуктуаций отвесов отмечается период май-август, период интенсивных изменений УВБ, что свидетельствует о значительных техногенных влияниях и высокой доли возбужденной сейсмичности в этот период.

2. Фильтрационный режим – наиболее чувствительный индикатор геодинамических воздействий, параметры которого целесообразно использовать в прогностических целях. Величина и продолжительность предвестников ожидаемого землетрясения в графиках дебита дрен, температуры дренажных вод и химического их состава зависят главным образом от магнитуды и в меньшей степени от расстояния и глубины очага. Во избежание дальнейшего ослабления правобережного упорного массива Чиркейской плотины обходным фильтрационным потоком требуется его повторная цементация.

3. По результатам геодезических наблюдений следует необходимость ежегодного контроля смещений в разломе Калудалкал и установки новых марок на левом берегу взамен утерянных, учитывая, что генеральный вектор смещений в районе створа направлен с левого берега на правый. Это направление подтверждается также наблюдениями ИФЗ РАН по системе GPS на пунктах DUBK и ZURA.

4. Существует возможность на базе измерительных систем всех плотин Дагестана создать региональную систему прогноза и раннего предупреждения подготовки опасных землетрясений и тектонических движений. В основу такой системы целесообразно положить введенную в действие в 2015 г. инновационную сейсмологическую систему Чиркейской ГЭС.

4.4. Зейская ГЭС

На плотине Зейской ГЭС с участием представителя ИФЗ РАН (А. Марчук, Башилов, Коновалов и др.) выполнено 4 цикла наблюдений. Кроме того, службой натуральных наблюдений Зейской ГЭС по нашим рекомендациям проводились ежедневные измерения контрольных параметров в периоды повышения УВБ с мая по август 1994–1996 гг., а в 1998 г. плотина была впервые оснащена сейсмометрической аппаратурой СКБ ИФЗ РАН. Главной проблемой района створа Зейской ГЭС является не столько сама плотина, сколько несейсмостойкий поселок Светлый на 12 тыс. жителей из крупнопанельных домов. Со времени строительства Зейской ГЭС расчетная сейсмичность района повышена с 6 до 9 баллов. В этих условиях задача контроля геодинамических сил и прогноза землетрясений становится настоятельной необходимостью.

Для инструментальной проверки наличия геодинамического влияния на плотину ИФЗ РАН совместно с ВНИИГ и службой натуральных наблюдений Зейской ГЭС в мае-августе и октябре-ноябре 1994 г. – в периоды интенсивного подъема УВБ и практически постоянного уровня водохранилища, начаты экспериментальные полевые исследования. Параллельно с сейсмометрическими наблюдениями на ближайшей сейсмостанции «Зея» (В. Г. Куличенко) проводились ежедневные измерения параметров фильтрационного режима, горизонтальных перемещений по отвесам, деформаций на контакте с основанием и раскрытия швов по трехосным щелемерам. Некоторые результаты этих исследований показаны на рисунках 64 и 65. Флуктуации всех контрольных

приборов, превышающие точность измерений, при постоянном УВБ свидетельствуют о существовании геодинамического влияния. При изменениях УВБ в пределах первых сантиметров пьезометрические уровни имели суточные размахи колебаний от 20 до 100 см, дебиты дренажных скважин – на 10–15 %, приращения деформаций на контакте – $0,9 \cdot 10^{-5}$ отн. ед., изменения концентрации растворенных химических веществ – в 2–4 раза (рис. 65).

В весенне-летнем цикле измерений с 11 мая по 31 августа 1994 г. при подъеме УВБ с отм. 304,5 до отм. 309,7 м сейсмостанцией «Зея» было зафиксировано 17 сейсмических событий энергетического класса от $K = 5,1$ до $K = 10$ с очагами на расстоянии 24–300 км от плотины. Большинство флуктуаций измеряемых параметров совпадали с этими сейсмическими событиями по времени, но чаще со сдвижкой в пределах 1–2 сут. из-за несинхронности измерений и, вероятно, инерционности струнных преобразователей или удаленности очагов.

Аномальными показаниями отличались береговые пьезометры в примыканиях плотины. Так, пьезометр П-2 в основании секции 10 у левого берега за период с 11 по 26 мая при повышении УВБ с отм. 304,5 до 305,5 м показал повышение уровня с отм. 285,5 до отм. 312 м или на 26,5 м и в дальнейшем оставался на этом уровне с колебаниями в пределах 5 м. Синхронность этих колебаний с изменениями уровня в пьезометре П-4 на правом берегу свидетельствует об их гидравлической связи и расположении этих пьезометров в зоне одного и того же тектонического нарушения.

Пьезометр П-15 скачкообразно изменил свои показания 10 июня 1994 г., повысив уровень с отм. 263,6 до отм. 319,6 или на 56 м. Через неделю уровень начал опускаться и 25 августа снизился до отм. 271,5 м. Оба скачка береговых пьезометрических уровней предшествовали сейсмические события. Не исключено также влияние талых поверхностных и грунтовых вод на эти пьезометры.

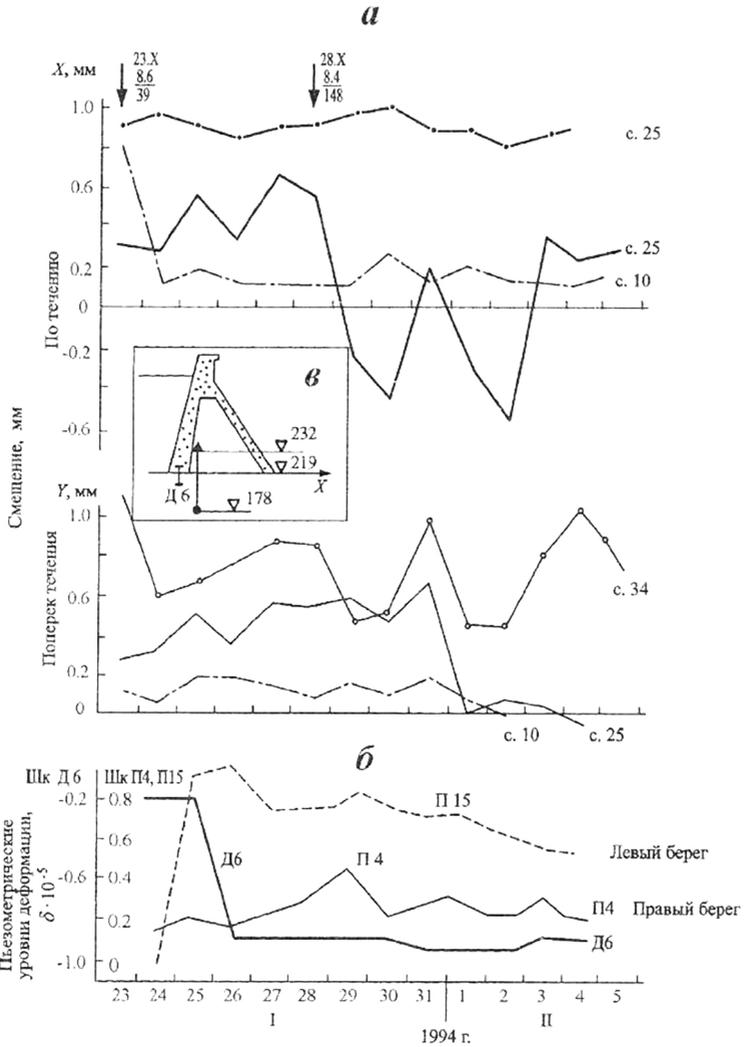


Рис. 64. Реакция обратных отвесов (а), береговых пьезометров (б) и контактного деформометра плотины Зейской ГЭС на сейсмические события 1994 г. при постоянном УВБ, (в) схема расположения приборов

Наибольшей синхронностью с сейсмическими толчками отличались показания обратных отвесов в сечениях 25 и 17 — по оси X (по течению), а в с. 32 — по оси Y (поперек течения). Максимальное суточное отклонение отвесов на отм. 232 м при толчках достигало

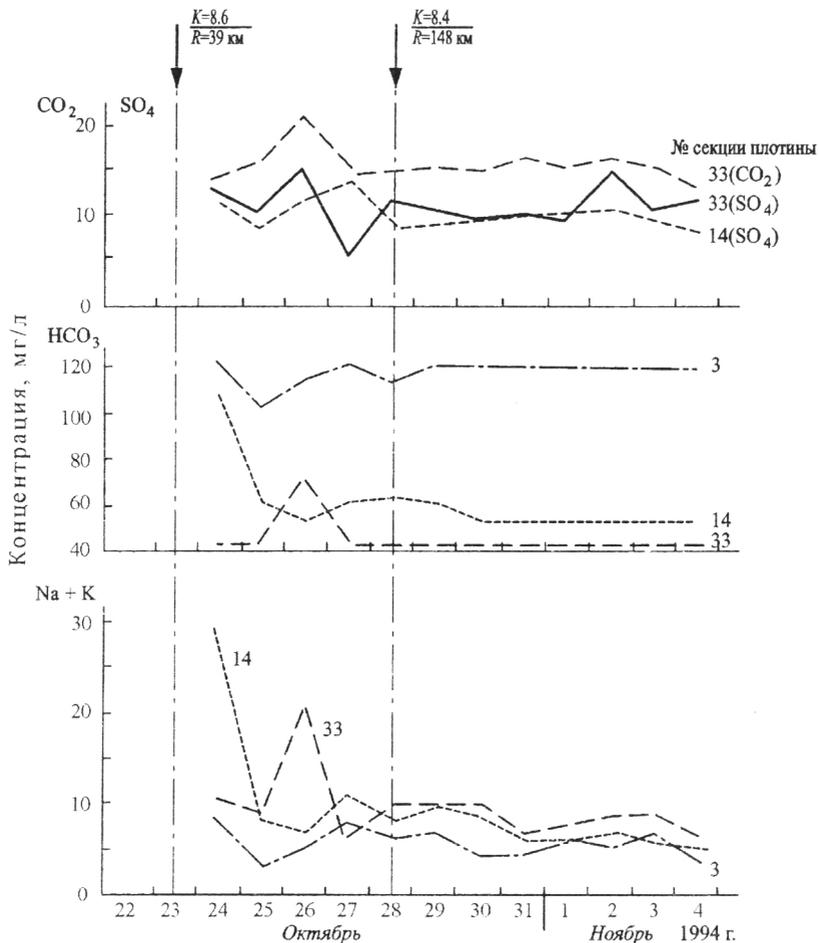


Рис. 65. Изменение концентрации химических веществ в дренажных водах основания плотины Зейской ГЭС в октябре-ноябре 1994 г. по данным химической лаборатории Зейской ГЭС

1–1,2 мм и было обратимым. При этом наибольшие флуктуации отмечались через 1–3 суток после события. Максимальный размах смещений вдоль потока по оси X имеет центральная русловая секция 25, по оси Y – с. 34 и 32 у левого берега, ближайшие к тектоническим нарушениям в основании. Щелемерные наблюдения показали наибольшую подвижность межсекционных швов плотины у прибрежных секций (швы 10/11, 11/12, 31/32 и в центральной части – шов 25/26). Значения подвижек были выше точности измерений до 0,2 мм и являлись обратимыми. Максимальные изменения отмечены по оси Y – вдоль створа, что свидетельствует о наличии объемного напряженного состояния в плотине.

Параметры фильтрационного режима в период наблюдений изменялись слабо, в основном в пределах точности измерений, что объясняется слабостью и удаленностью сейсмических событий, а также малой глубиной дренажных скважин (60 м).

Период наблюдений май–август 1996 г. отличался слабо изменяющимися низкими УВБ, благодаря чему можно более четко выделить геодинамические влияния. В марте 1996 г. при УВБ 301,78 м по сравнению с мартом 1994 г. при УВБ 305,01 м на 0,5–1 мм восстановилась осадка плотины, уменьшились смещения в межсекционных швах. Из каталога сейсмостанции «Зезя» можно выделить за указанный период 6 значимых сейсмических событий, получивших отклик в измерительных системах плотины:

12 мая 1996 г. $K = 8,9$, $R = 153$ км; 3 июня – три толчка в т. ч. $K = 10,6$, $R = 200$ км; 13 июня $K = 11,1$, $R = 79$ км; 2–3 июля – четыре толчка, в т. ч. $K = 9,3$, $R = 133$ км; 22 июля $K = 7,1$, $R = 42$ км; 1 августа $K = 8,9$, $R = 118$ км; 7 августа $K = 8,8$, $R = 86$ км. На фоне общей слабой реакции на геодинамические воздействия наиболее четко сейсмогенные скачки выражены в графиках обратных отвесов прибрежных с. 10 и 34, а также с. 25 в центре станционной плотины. Характерно, что по оси Y смещения секций имеют направление преимущественно к левому берегу, что означает существование усилия справа, со стороны более высокого правого берега.

В 1997 г. водохранилище Зейской ГЭС было сработано впервые за 15 лет до отм. 299 м, после чего трехлетний маловодный период завершился, в июне-августе УВБ был поднят на 10,5 м, с интенсивностью более 3-х м в месяц. Такой режим вызвал рост сейсмической активности. Число толчков, зарегистрированных сейсмостанцией «Зея» в июне-июле возросло до 16 с увеличением энергетического класса до $K = 10,6-12,4$ против 10 за эти же два месяца 1996 г. По бюллетеням сейсмостанции «Кировский», близкой к центральной части водохранилища, число толчков энергетического класса $K \geq 8$ в августе 1997 г. возросло в 5 раз по сравнению с августом 1996 г. (рис. 66).

Из каталога сейсмических событий сейсмостанции «Зея» за 1997 г. выделяются четыре наиболее сильных: 4 июня 1997 г. $K = 11,6$, $R = 263$ км, 29 июня $K = 10,6$, $R = 202$ км, 29 июля

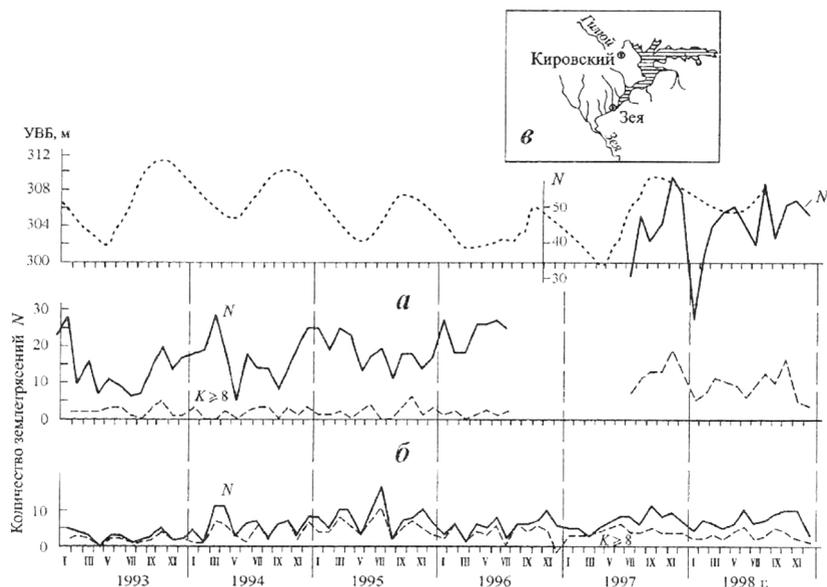


Рис. 66. Сравнительная сейсмическая активность в районе Зейской ГЭС по каталогам сейсмостанций «Кировский» (а) и «Зея» (б) с расстоянием до 300 км от плотины, (в) схема размещения сейсмостанций

$K = 10,3$, $R = 94$ км, 10 ноября $K = 12,4$, $R = 264$ км. Анализ штатных измерений контрольных параметров 1997 г. показал наличие отклика измерительных систем на указанные события и их подготовительный период, особенно на толчки с максимальной энергией: 4 июня $K = 11,6$ и 10 ноября $K = 12,4$. В с. 17, 25 и 32 сравнение отсчетов по закладным деформометрам до землетрясения 10 ноября 1997 г. (8 октября) и после него (12 ноября) при равных УВБ и слабо изменяющейся температуре в зоне установки приборов показало, что сейсмическое событие $K = 12,4$, $R = 265$ км зафиксировали 60–70 % датчиков. Наиболее заметные изменения деформаций отмечены в центральной русловой с. 25 стационарной плотины (рис. 67). Они подтверждаются и геодезическими наблюдениями по трехосным щелемерам в швах и по показаниям прямого отвеса в с. 25.

Наиболее чувствительные правобережные дрены в основании с. 10 и 27 на границе руслового разлома начали аномально увеличивать дебит при постоянном УВБ с 13–16 октября 1997 г., т. е. за 23–26 суток до землетрясения 10 ноября 1997 г. В это же время отмечены аномалии в пьезометрических уровнях, когда при подъеме УВБ на 6 см правобережный пьезометр П-6 снизил уровень на 6,1 м, а пьезометр П-2 в конце сентября упал на 5,8 м, в конце октября – еще на 1,63 м. На левом берегу скачки пьезометров были меньше: снижение 4,8–1,8 м при повышении УВБ на 1,6 м. Можно предположить поэтому, что напряжения сжатия на правом берегу были примерно в 1,5 раза больше. Из 70 русловых дрен на землетрясение 10.11.1997 среагировали 29 дрен, или 41,4 %. Наибольшее число откликов отмечено у дрен в зоне влияния правобережного разлома (тектоническая зона 8). Их дебит увеличился на 20 % при снижении УВБ в октябре на 1,6 м.

Наполнение водохранилища в 1998 и 1999 г. происходило в более «мягком» режиме, что обусловило снижение сейсмической активности. Последний цикл измерений с участием ИФЗ РАН выполнен в июле-августе 1999 г. – в период полного сейсмического затишья, подтвержденного вновь установленной сейсмоаппаратурой на плотине. Результаты всех измерений, включая

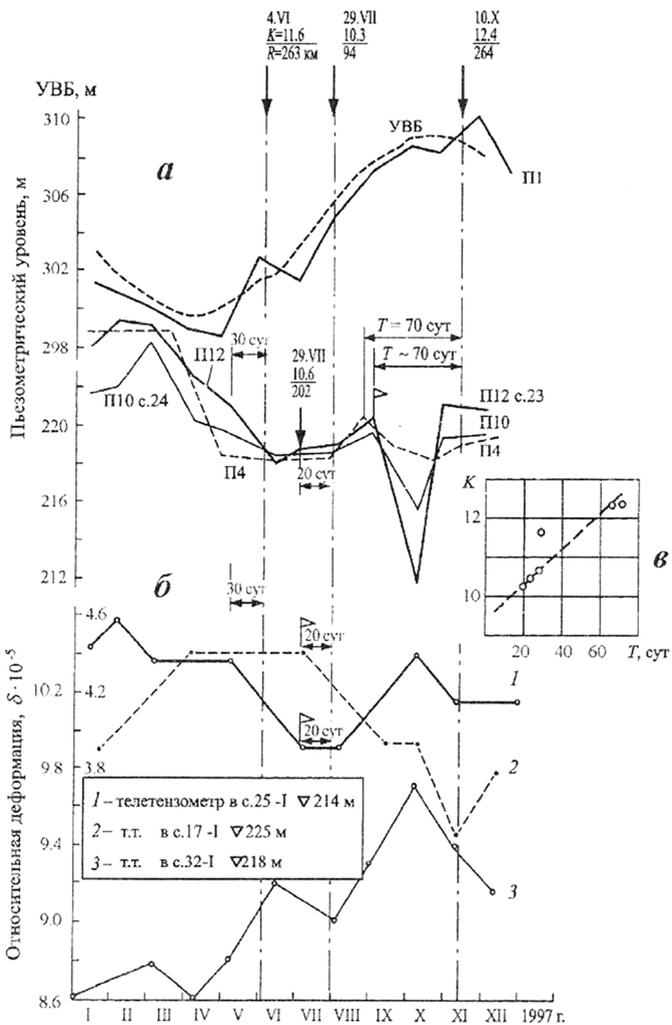


Рис. 67. Отклик пьезометров (а) и телензиметров в приконтактной зоне основания плотины Зейской ГЭС (б):
 1 – телензиметр № 1-73 на отм. 214 в 1 столбе секции 25,
 2 – телензиметр № 4-72 на отм. 225 в 1 столбе секции 17,
 3 – телензиметр № Д6 на отм. 218 в 1 столбе секции 32,
 (в) примерная зависимость $T=f(K)$

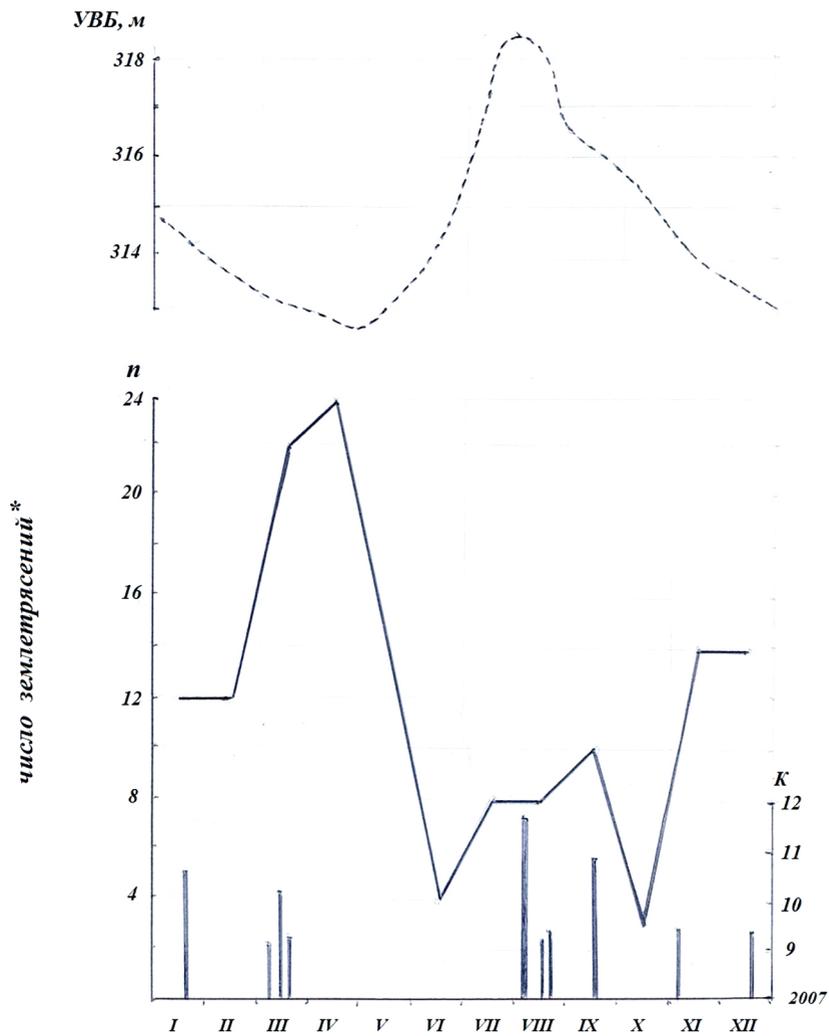
геохимический анализ дренажных вод, оказались в пределах точности измерений, что еще раз доказывает эффективность мониторинга геодинамического влияния с помощью измерительных систем плотин. В период сейсмического затишья (июль–август 1999 г.) геодинамическое влияние не обнаруживается.

Анализ результатов штатных наблюдений в многоводном 2007 г. с высоким пиком паводка, а также в многоводном 2008 г. показал характерное распределение сейсмических событий в водохранилищном регионе – максимальное число землетрясений отмечено в периоды низких УВБ, а наиболее сильные события совпадают по времени с высокими уровнями водохранилища (рис. 68), что свидетельствует о явной связи сейсмической активности с режимом изменений УВБ.

В период высоких паводков 2011–2013 гг. на Зейской ГЭС была подмыта и повреждена раздельная стенка между зданием ГЭС и водосливной плотиной. Ремонт стенки с помощью буронабивных свай оказался неэффективным, сваи были сломаны очередным паводком. Кроме того, в нижнем бьефе за водосливной плотиной образовалась воронка размыва глубиной до 12 м. Разрушение горных пород в зоне падения сбросного потока приурочено к Зейскому разлому в пределах схода струи на фронте секций 26–29, где отмечаются блоковые движения и максимальные смещения секций 13–17 плотины по потоку.

Основные выводы по результатам исследования геодинамического влияния на плотину Зейской ГЭС сводятся к следующему:

1. Контрфорсная плотина Зейской ГЭС, расположенная в створе хребтов Тукурингра–Соктахан, находится в объемном напряженном состоянии, является чувствительной к геодинамическим воздействиям. Среди них кроме расчетной сейсмичности до 9 баллов в первую очередь отмечаются активные блоковые движения в головной части водохранилища и в створе гидроузла, выявленные нивелировками воронки оседания, галерей и гребня плотины. Они отмечаются также щелемерами в швах одиннадцати секций русловой части плотины и даже протечками в швах 22/23 и 24/25.



* - за вычетом взрывов

Рис. 68. Связь региональной сейсмической активности с изменениями уровня водохранилища Зейской ГЭС

2. Требуют инструментального контроля смещения и состояние горных пород правобережного примыкания плотины, проявляющего признаки крипового давления на сооружение. Это давление передается на контрфорсы по конструкциям перекрытия полостей. Целесообразно разработать и реализовать методику измерения длины плотины по гребню или расстояния между берегами в створе. По величине изменения этой длины можно будет судить о величине геодинамического влияния при быстрых и медленных движениях земной коры и напряжениях вдоль плотины.

3. Анализ результатов измерения всех контролируемых параметров в период сейсмического затишья в районе Зейской ГЭС показал их стабильность в пределах точности измерений. Поэтому можно считать, что значимые геодинамические воздействия провоцируются в основном сейсмической активностью. Влияние медленных и блоковых движений требует более тонких и точных измерений.

4. На больших плотинах в районах сурового климата (Зейская, Саяно-Шушенская) необходимо более тщательно изучать режим обходной фильтрации в зимнее время, положение кривой депрессии при замораживании и оттаивании откосов, его влияние на изменение поля напряжений в породах, на устойчивость откосов в береговых примыканиях и на напряженное состояние береговых секций.

5. Затопленный режим дренажа в основании плотины делает его малоэффективным, нежелательным с точки зрения контроля сейсмостойкости плотины и точности измерений дебита дрен при кратковременном осушении дренажной галереи, когда фильтрационный режим является неустановившимся. Желательно осушить цементационную и дренажную галереи, прочистить пьезометрические и дренажные скважины, пробурить более глубокие геофизические скважины.

6. Существует необходимость модернизировать систему струнного створа САК ГС Сибгеоинформ на основе более совершенных датчиков и защитить ее от механических повреждений.

7. Глубокий размыв русла за водосливом должен быть ликвидирован, заделан бетоном с включением крупногабаритных камней, с армированием плиты в верхней зоне.

4.5. Бурейская ГЭС

Бурейская ГЭС на р. Бурее [Боярский, Васильев, 1995], введенная в действие в 2003 г. и включенная в программу ИФЗ в 2007 г., расположена близко от границы между воздымающимся Буреинским хребтом и опускающейся Приамурской впадиной, в зоне влияния Хинганского и Бурейского рифтов. Район с сейсмичностью 8 баллов по карте ОСР-97.

Створ гравитационной плотины высотой 139 м и длиной 765 м вписан в узкую долину с высокими скальными берегами из палеозойских гранитов, рассечен четырьмя крупными тектоническими трещинами и разломом северо-восточного простирания на более высоком правом берегу.

По данным Института тектоники и геофизики (ИТиГ) ДВО РАН, в 2006 г., когда напор на плотину впервые превысил 90 м, более 42 % сейсмособытий можно считать возбужденными. В 2007 г. при напоре 120 м эта доля повысилась до 52 %. В период с 2010 по 2011 г. наиболее значимыми событиями были природные землетрясения 23.12.2010, $M = 4,7$, на расстоянии 600 км от плотины, 15.01.2011, $M = 5,1$, на расстоянии 340 км и 5.02.2011, $M = 5,3$, на расстоянии 320 км от плотины.

Наблюдения на Бурейской ГЭС подтвердили все закономерности, установленные исследованиями ИФЗ для других плотин, но вместе с тем здесь обнаружилась необычно высокая чувствительность измерительных систем к далеким сейсмическим событиям. Автоматизированные пьезометры в основании плотины зафиксировали отклик на Курильские землетрясения 15.11.2006, $M = 8,2$, и 13.01.2007, $M = 8$, с эпицентральной дистанцией около 1600 км от плотины при постоянном УВБ и при отсутствии близких сейсмических событий (М. Е. Харитонов). Однако наибольший интерес вызывают аномалии в показаниях приборов

в период с октября 2010 г. по март 2011 г. В конце февраля – начале марта 2011 г. в основании нескольких секций плотины увеличились фильтрационные расходы на 5–10 % при монотонном снижении УВБ. В некоторых дренажных скважинах дебит увеличился вдвое. Аномальные, в основном обратимые, смещения с февраля до марта показывали сдвигомеры в правобережной с. 3 до 50,66 мм на глубине 25,5 м, а у левого берега в с. 43 на отм. 175 м до 14 мм. Синхронно с ростом фильтрационных расходов деформометры в приконтактной зоне бетона в русловой части плотины скачком отметили увеличение напряжений, а глубинные пьезометры – приращение уровней до 10 м. Прыжок на 100 м показали контактные пьезометры в основании секции 32 (рис. 31).

Имея в виду ранее установленный отклик пьезометров на Курильские землетрясения, можно предположить, что указанные аномалии в измерительных системах Бурейской ГЭС являются предвестниками и откликами на подготовку и катастрофическое событие в провинции Фукусима в Японии. При этом учитывается отсутствие близких значимых региональных землетрясений и выводы ИТиГ об активности субмеридиональных разломов Бурейской сейсмоактивной зоны, проходящей через расположение плотины. Эта зона входит в Танлу-Охотскую рифтовую систему, связанную с Япономорским участком Тихоокеанского сейсмического пояса. Изложенное предположение вносит новые представления в теорию предвестников и подлежит проверке с помощью измерительных систем Бурейской ГЭС.

ГЛАВА 5

ОБОБЩЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опыт натуральных наблюдений за статической и динамической работой высоконапорных бетонных плотин убеждает в необходимости отдельного анализа результатов по группе арочных и гравитационных типов сооружений. Если по массивным гравитационным плотинам наши проектные представления удовлетворительно подтверждаются натурными наблюдениями, то исследования на арочных плотинах свидетельствуют о несовершенстве наших знаний в вопросах взаимодействия сооружений статически неопределимого, распорного типа с вмещающей геологической средой. Жесткая упругая связь с геоблоком основания, а точнее с иерархией геоблоков, не подчиняется полностью законам геомеханики и теории упругости, расчетам по методу конечных элементов, изменяет характер работы во времени, вносит элемент случайности. В тектонически активных регионах особенно заметны различия между проектными предположениями и действительным напряженно-деформированным состоянием арочных плотин. К сожалению, изучение особенностей горных пород — основания, их изменений во времени, по-прежнему ограничивается в основном лишь периодом изысканий, а влияние вмещающего геоблока на НДС плотин и смещения массивов пород в створах плотин в период эксплуатации исследуется только в случае аварий и существенных отклонений от проектных предположений.

Обобщение целесообразно выполнить по типам плотин.

5.1. Арочные плотины

Фактические напряжения в арочных плотинах иногда в 2 раза и более превосходят проектные расчетные значения. Зоны максимальных напряжений в сооружении по местоположению, по величине и по знаку часто не совпадают с ожидаемыми по проекту. Это утверждение иллюстрируется таблицей 15.

**Максимальные расчетные и измеренные напряжения
арочного сжатия в плотинах**

Плотина	$\sigma_{ароч}^{max}$, МПа		Локализация $\sigma_{ар}^{max}$	
	По расчету для основного соче- тания нагрузок	Фактически	По расчетам	Фактически
Ингульская	9,29	15,0	В ключе верховой границы (ВГ)	Секция 12 низовая грань в нижней части правобережной трети
Чиркейская	7,90	12,5	В ключе ВГ в сред- ней по высоте части	Низовая грань у левого берега
Саяно-Шушенская	7,20	15–18	Приречневая часть ВГ ключевой секции	На низовой грани береговых секций
Миатлинская	4,7	До 15,7	В верхней части верховой грани ключевой секции	В нижней части низовой грани

Из таблицы видно, что принципиальное положение расчета о максимальных напряжениях на напорной грани ключевых секций арочных плотин от действия гидростатического давления в действительности не оправдывается. Большему сжатию подвергается низовая грань, что может быть только следствием арочной схемы и давления со стороны береговых примыканий, следствием геодинамического воздействия. Дело в том, что при выборе створов плотин недооценивается необходимость исследования неотектоники и собственных тектонических напряжений в береговых массивах пород или обнаруженные движения считаются весьма малыми, не заслуживающими внимания. Редко изучаются изменения тектонических напряжений вмещающих массивов, их величина и ориентация, потенциальная активность ближайших разломов, влияние водохранилища на породы в створе, возможность возникновения возбужденной сейсмичности в период эксплуатации. Геологи обычно считают, что геоблок, отчлененный разломами первого и второго порядков, является «единым» и заметные тектонические движения в нем невозможны. Это положение противоречит теории дискретной иерархической среды, признающей, что движения блоков могут быть на любом масштабном уровне. А флюидная составляющая в переменном поле напряжений и возбужденная сейсмичность неизбежно активизируют этот процесс. Упрощенный, геомеханический подход гидротехников к геодинамике привел к нескольким драматическим ситуациям – авариям плотин Мальпасе, Вайонт, реконструкции плотины Кельнбрайн в Австрии, к ремонту нескольких конфорсных плотин в Китае и в Канаде.

Конечно, за сравнительно короткий период времени производства изысканий и строительства тектонические движения могут и не проявиться. Но это не значит, что их не будет в течение всего срока службы плотины. Основную роль в активизации геодинамических процессов в районах расположения крупных плотин играют водохранилища. Активность вмещающих их горных пород тем выше, чем сложнее горное сооружение, чем выше в нем тектонические напряжения, чем больше амплитуда

изменений уровня водохранилища, как это наблюдается в створах Чиркейской, Саяно-Шушенской ГЭС и Ингурской плотин на антиклиналях. Существует устойчивое представление о податливости и развале берегов при статической работе арочных плотин, взаимодействие которых с берегами рассчитывается по способу Ф. Фогта. Существо способа состоит в том, что перемещения на контактах скала–бетон определяются как для упругого полупространства, нагруженного силами, передаваемыми от арки. Коэффициенты податливости Фогта зависят от величины этих сил, площади передачи усилий и коэффициента Пуассона пород. Согласно этому расчету, арка должна раскрываться с максимумом сжатия в ключе и растяжением в пятах на напорной грани и растяжением в ключе на низовой. Однако, как видно из таблицы 15, этого не происходит. Наоборот, вместо податливости береговых упоров наблюдается их криповое силовое воздействие на плотину, увеличивающее арочное сжатие. Крип возникает при разгрузке собственных тектонических напряжений в береговых массивах из-за снижения параметров сопротивления сдвигу от водонасыщения пород, изменений УВБ, температуры и сейсмических воздействий. Наши расчеты показывают, что величину этого крипового давления можно примерно определить по формуле Терцаги–Динника. Например, для береговых массивов в створе Чиркейской плотины горизонтальное напряжение при коэффициенте Пуассона $\nu = 0,2$

$$\Delta\sigma_a = [\nu/(1 - \nu)] \cdot \Delta\sigma h \quad (1)$$

будет равно 1,21 МПа. В действительности оно, вероятно, несколько выше из-за собственных тектонических напряжений в массиве и гидростатического давления обходной фильтрации.

По данным ВНИИГ, разница в арочных напряжениях сжатия в симметричных секциях X у правого берега и IX левого плотины Чиркейской ГЭС составляет в центре секций на отметке 215 м $\Delta\sigma_a = 1$ МПа, что корреспондируется с формулой (1), а на верховой грани на отметке 325 м, где сказывается давление потенциально неустойчивого откоса, 4,6 МПа. Именно это кри-

повое давление в направлении склона Хадумской антиклинали из-за литостатической неравномерности берегов в совокупности с потенциально оползневым откосом создает депланацию арки с большим смещением правобережного крыла в нижний бьеф и характерной картиной трещиноватости (рис. 69). Эти смещения в совокупности с обильными осадками были, по нашему мнению, главной причиной обрушения породы в правобережном примыкании в ноябре 1991 г. Со стороны левого берега в секции IX на отм. 240 м низовой грани зафиксировано максимальное из измеренных значений арочного сжатия 13,5 МПа.

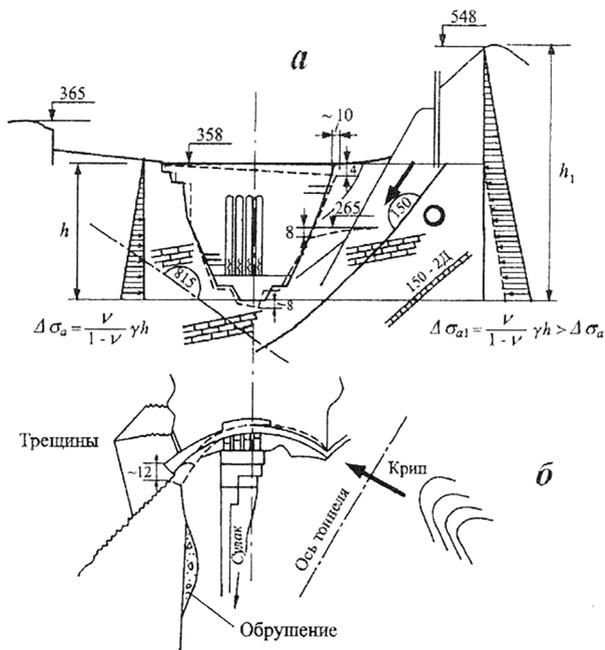


Рис. 69. Схема литостатической неравномерности берегов и деформаций в створе плотины Чиркейской ГЭС по состоянию на 1998 г.:

a — вид с нижнего бьефа, *б* — схема депланации арки. Стрелками показаны векторы оползневой и крипового давления

Этот максимум образовался за 22 года медленного роста сжатия от значения 8,9 МПа в 1979 г. и от 12,5 в 2000 г. до 13,5 МПа в 2005 г. Надо полагать, что в условиях сейсмической активности он будет развиваться и дальше. Его опасность заключается прежде всего в снижении устойчивости заанкеренного откоса левого берега над зданием ГЭС, что требует более совершенного контроля за состоянием потенциально неустойчивого массива, например с помощью длиннобазовых цифровых деформометров. Одновременно сосредоточенный обходной фильтрационный поток по правому берегу снижает деформационные характеристики горных пород правобережного упора плотины. Безопасность арочной плотины Чиркейской ГЭС целиком зависит от состояния вмещающей геологической среды, как и сохранность тоннельного водосброса на левом берегу.

В створе Саяно-Шушенской плотины, расположенной на крутом склоне Джебашско-Джойского антиклинория с высокими собственными тектоническими напряжениями, ситуация осложнена особенностями рельефа береговых примыканий и несколькими тектоническими зонами, пересекающими основание и береговые примыкания в контуре плотины (рис. 70). Литостатическая неравномерность здесь составляет примерно 90 м из-за более высокого правого берега. Принимая во внимание высокие собственные напряжения в массиве, по гипотезе Терцаги–Динника, указанная неравномерность при плотности пород $2,90 \text{ т/м}^3$, среднем коэффициенте Пуассона для пород правого берега 0,28 увеличивает арочные напряжения на 1,8 МПа. Измеренная разница напряжений между симметричными секциями 10 на левом и 55 на правом составляет 2,2 МПа на отм. 434 м и 3,8 МПа на отм. 504 м. Большая разница на отметке 504 м объясняется ее расположением в пределах призмы сработки, где параметры сопротивления сдвигу априори ниже из-за постоянной смены уровней водохранилища.

Максимальные арочные напряжения в 1993 г. после четырехкратного подъема УВБ до НПУ 540 м имели значение 7,8 МПа на напорной грани в верхней части арки, что соответствовало

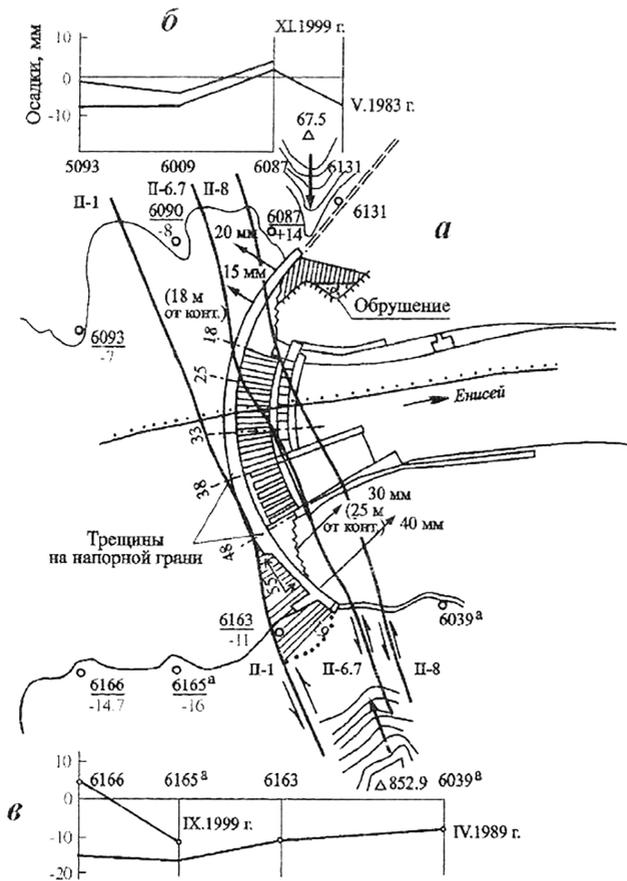


Рис. 70. План-схема створа Саяно-Шушенской ГЭС и факторы геодинамического воздействия:
a — зоны основных тектонических нарушений и высотной неравномерности берегов, *б* — осадки левого берега, *в* — осадки правого берега. Тонкие стрелки-смещения в штольне на отм. 467 м в 1989–1992 гг., жирные стрелки — векторы тектонического сжатия и крива. Заштрихованы потенциально неустойчивые массивы

расчетным предположениям. В береговых секциях арочное сжатие на отм. 504 и 462 м составляло, соответственно, 2,5–3,5 МПа [Антонов и др., 1994]. В 1995 г. максимум сжатия достиг значения 10,7 МПа, в береговых упорах на отм. 540 м – 7,3 МПа. А в 2001 г. при УВБ 539 м максимум арочного сжатия фиксировался уже на низовых гранях береговых секций с локальными значениями до 15–18 МПа. Одновременно с ростом сжатия (рис. 71) отмечалось сокращение длины дуги арки в 1993 г. на 17–18 мм на отм. 413–467 м. В 1996 г. уменьшение длины дуги на отм. 467 м, измеренное по методике ИГД СО РАН, составило 46 мм, а на отм. 521 м – 72,5 мм, т. е. арка продолжала сжиматься, в результате чего на поверхности верховой грани русловых секций 38 и 48 появились вертикальные трещины. Обе эти секции являются граничными по отношению к водосливной плотине и упираются в устой-стенки водобойного колодца.

Максимальные деформации сжатия и сближения берегов по геодезическим измерениям отмечены в пределах призмы сработ-

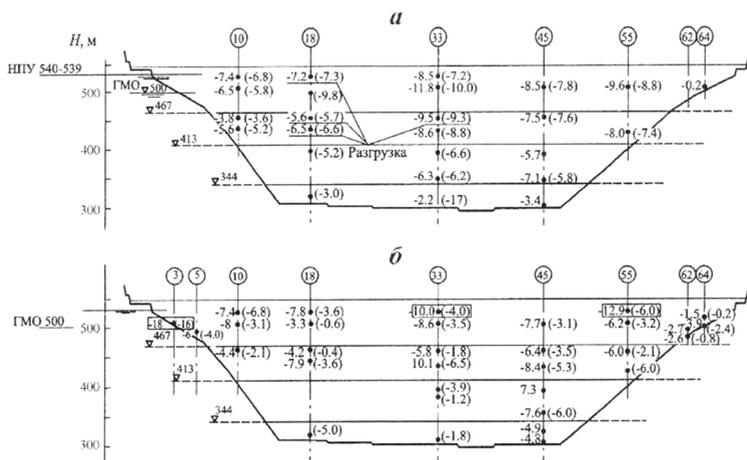


Рис. 71. Арочные напряжения на напорной (а) и низовой грани (б) плотины Саяно-Шушенской ГЭС в 2001 г. при УВБ 538,88 м по сравнению с 1997 г. (в скобках) при УВБ 540 м

ки, между отметками 540 и 500 м, но процесс этот носит глубинный характер, поскольку якоря обратных отвесов, заглубленные в основание, имеют тангенциальные смещения с преимущественным направлением к левому берегу (рис. 72). Встречному крипу со стороны береговых массивов способствует также уплотнение пород основания в русле на глубину 80–100 м из-за химической суффозии со снижением модуля деформации, выносом заполнителя трещин под действием высокоградиентного фильтрационного потока и постоянной принудительной откачки. Процесс выравнивания собственных напряжений во вмещающем геоблоке под плотиной определяет вектор смещений в сторону низко модульной среды, к русловому разрывному нарушению. Этим смещениям препятствует жесткое тело плотины, благодаря чему напряжения сжатия даже в приконтактной ее части возрастают (рис. 73), что в арочных плотинах отмечается редко. Свой вклад в этот процесс вносят вибрации от работы водобойного колодца и многочисленные слабые сейсмические события.

Индикатором изменений поля напряжений в скальном массиве может служить режим обходной фильтрации – дебит дренажных скважин и показания пьезометров. Сжатие береговых упоров при подъеме УВБ выжимает депонированную воду в дренаж, увеличивая дебит, а при смыкании трещин вызывает его падение. Смещения в створе плотины ориентированы по поверхностям трех основных субпараллельных тектонических нарушений, пересекающих русло под углом примерно 20° к оси створа плотины и пересекающих левобережное примыкание. Такая ориентировка и сниженный модуль деформации по выдержанным плоскостям тектонических зон способствует разложению распорного усилия от гидростатического давления на компоненты по нормали к опорной поверхности зоны П-8 и вдоль нее. Но поскольку продольной компоненте сопротивляется небольшой массив, ограниченный оврагом-заливом, то левобережные секции кроме нормального смещения к левому берегу имеют смещение и в верхний бьеф, как это следует из показаний обратных отвесов в с. 18.

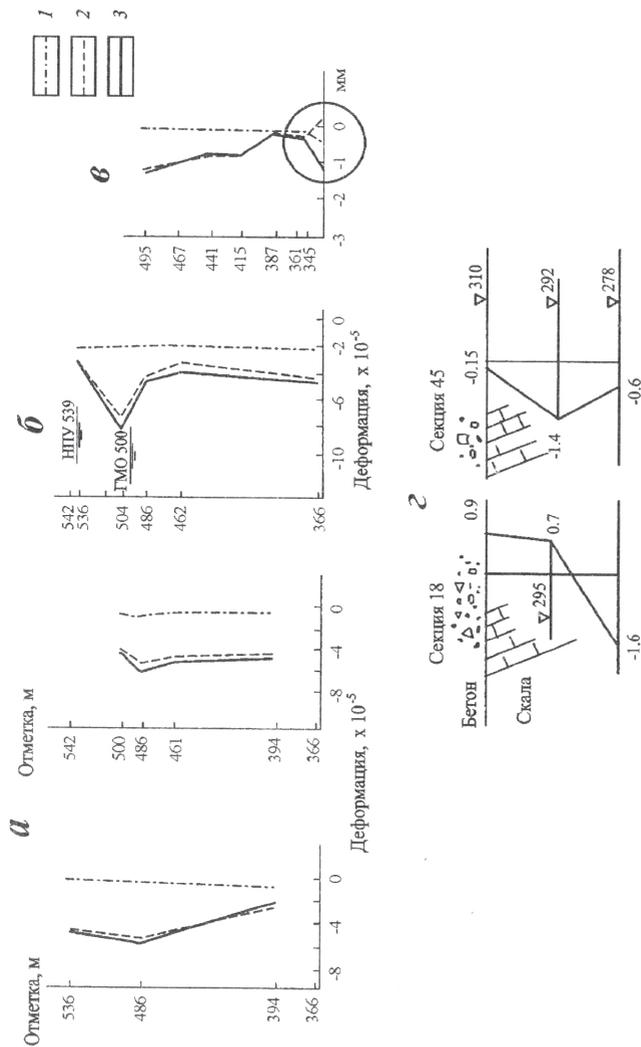


Рис. 72. Приращение деформаций арочного сжатия в бетоне у примыканий плотины Саяно-Шушенской ГЭС в 2001 г. относительно 2000 г. при повышении УВБ с 500 до 538,90 м:

a — у нижней грани, *б* — у верхней грани, *z* — приращение раскрытий правобережного примыкания на расстоянии 21–51 м от оси плотины. Кругом обозначены признаки унаследованного движения,

z — приращения смещений якорей обратных отвесов в основании секций 18 и 45 плотины Саяно-Шушенской ГЭС в марте-апреле 2001 г. Знак «минус» — к левому берегу

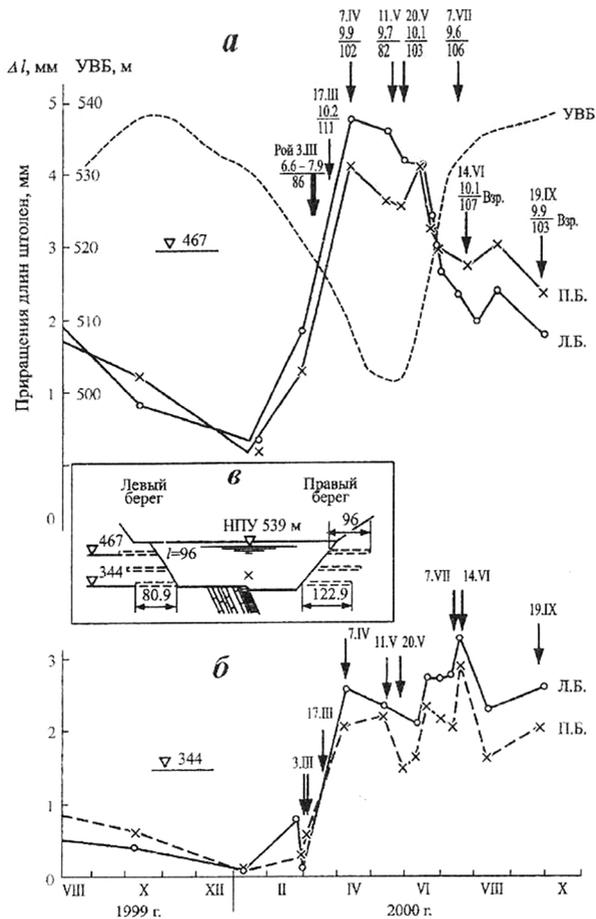


Рис. 73. Приращения длин штолен в береговых примыканиях плотины Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от УВБ и сейсмических событий (по данным геодезической службы Саяно-Шушенской ГЭС):
а – штольни на отм. 467 м, *б* – штольни на отм. 344 м,
в – схема береговых штолен

Представляют интерес результаты измерений собственных тектонических напряжений в массиве левобережного примыкания в конце штольни на отм. 467 м. Первое из них было определено при изысканиях в 1964 г. со средним результатом 18 МПа. В 1995 г. ИГД СО РАН по заданию ЦСГНЭО определил среднюю величину в размере 9 МПа. Последний эксперимент, проведенный ЦСГНЭО в 2002 г., показал результат 6 МПа. Таким образом, за 30 лет разгрузка тектонических напряжений составила около 12 МПа, что при среднем значении модуля деформации массива 12 500 МПа равнозначно перемещению примерно 92 мм и соответствует порядку измеренных величин сокращения длин хорд. График разгрузки интерпретируется почти прямой линией, хотя ее интенсивность с 1995 по 2002 г. возросла до 0,41 МПа в год против 0 38 МПа/г за период с 1978 по 1995 г.

В 2013 г. в работу вступил правобережный береговой водосброс (БВС) на пропуск паводковых вод с расходом 4000 куб. м/сек. Он состоит из тоннельной и лотковой части шириной 100 м с пятью перепадными водосливными стенками и водобойными колодцами. Лоток прорезает правобережный массив между Кантегирским разломом и правобережным примыканием плотины. Наблюдения за пьезометрическими уровнями в правобережном примыкании плотины в пределах секций 46–59 во время пропуска расхода 3000 куб. м/сек в 2013 г. показали значительное влияние на поле напряжений в опорном массиве пород. Уровни повышались от 10 до 40 м. Кроме того, следует ожидать уменьшения или снятия действия тектонического горизонтального сжатия, отрезанного лотком БВС, что подлежит дополнительному исследованию.

Измерения длин штолен при изменениях УВБ, выполняемые геодезической службой ГЭС, показывают значительно большие размахи изменений длины левобережных штолен по сравнению с правобережными и большие значения остаточных деформаций на левом берегу. При снижении УВБ на 35 м приращения длин штолен левого берега в среднем в 1,4 раза больше, чем на правом.

А при наполнении водохранилища на те же 35 м, длины левобережных штолен сокращаются в 2 раза больше, чем правобережных. Реакция на сейсмические события более заметна на правом берегу, ближе к которому расположены основные сейсмогенерирующие разломы (рис. 74). Эти сезонные знакопеременные деформации обводненных береговых массивов, проникающие на глубину 100 и более метров, являются главной причиной разгрузки собственных тектонических напряжений. Изменения длин правобережных штолен, в связи с вводом в действие БВС, подлежат уточнению.

В створе Ингурской плотины также наблюдается депланация арки с большим смещением у ослабленного разломом правого берега. При этом смещения обоих береговых упоров развиваются субпараллельно Ингиришскому разлому (рис. 74). Максимальные расчетные арочные напряжения сжатия в плотине для НПУ 510 м были превышены уже при УВБ 483 м. В этот период зафиксировано сокращение длины хорды на отм. 282 м (4-й горизонт)

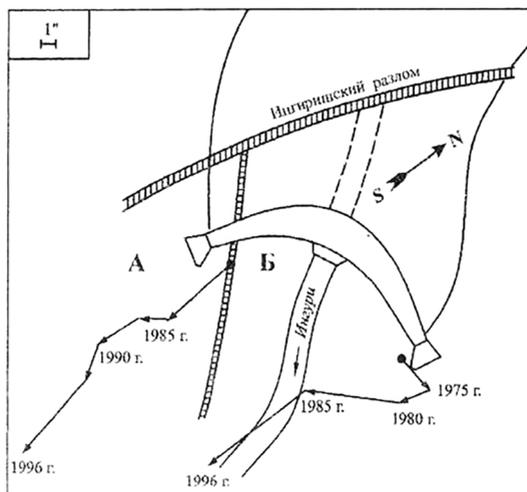


Рис. 74. Схема смещений в береговых примыканиях Ингурской плотины (по Г. И. Кузнецову)

на 22 мм. Впоследствии при повышении УВБ к 1985 г. произошло удлинение этой хорды на 5,5 мм. Проверка геодезической сети в районе створа плотины выявило перемещение поверхностных марок скального массива правого берега к плотине и водохранилищу. На левом берегу в нижнем бьефе геодезические пункты сместились в направлении потока. На отметках выше гребня зафиксировано схождение берегов. Наблюдениями отмечено снижение расходов обходной фильтрации более интенсивное на левом берегу, что можно считать результатом увеличения тектонического сжатия нормально к руслу, вдоль створа плотины (табл. 16).

Таблица 16

**Изменение суммарных фильтрационных расходов по берегам
в створе Ингури ГЭС при НПУ 510 м, л/с**

Место измерения	31.08.1987 УВБ 510 м	03.10.1988 УВБ 509,95 м	10.08.1989 УВБ 509,7 м	18.08.1990 УВБ 510 м
Правый берег	1488	1339	1213	1110
Левый берег	2588	2043	1952	1860

Генеральный вектор смещения плотины Чиркейской ГЭС также направлен параллельно разлому Калудалкал, вниз по склону Хадумской антиклинали, в сторону правого берега.

Плановые смещения Миатлинской плотины определяет правобережный оползневой массив с вектором движения примерно под углом 15° к оси створа (рис. 76). Поверхность скольжения оползневого массива проходит, вероятно, под основанием арочной плотины т. к. ее осадки имеют положительное значение (выпор) с максимальной величиной около 8 мм под ключевой секцией по состоянию на 2000 г. Вертикальные смещения в межсекционных швах плотины достигают 7,3 мм между I и II с. Правое крыло плотины смещается в верхний бьеф относительно левобережного устоя на 15 мм, в результате чего на низовой грани плотины раскрывается шов между устоем и с. VII. Скорость дви-

жения оползня находится в прямой зависимости от количества осадков и активности сейсмических событий. О влиянии оползня говорит, например, тот факт, что во время землетрясения в январе 1999 г., по данным нивелировки гребня (Х. Рурахмаев), плотина испытала кратковременный подъем на 25 мм у правого берега и на 9 мм у левого (рис. 75).

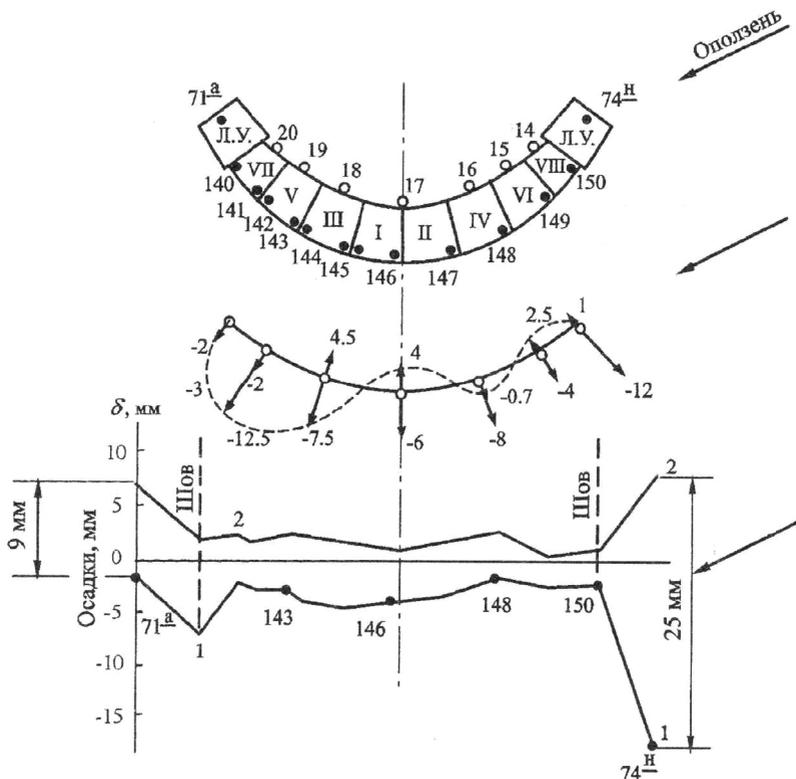


Рис. 75. Горизонтальные смещения марок на низовой грани и осадки гребня плотины Миатлинской плотины до (10.08.1998, УВБ 151,80) и после (24.02.1999, УВБ 151,30) землетрясений 31.01.1999 и 21.02.1999. Жирными линиями и стрелками показано положение до землетрясений (по Х. Рурахмаеву и Д. Брехману)

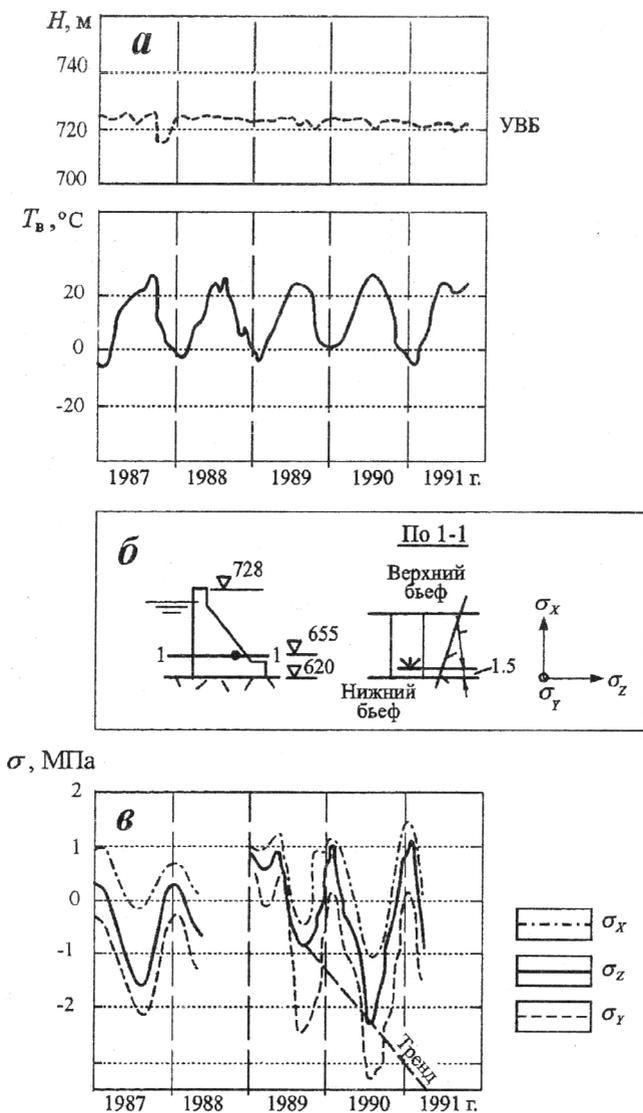


Рис. 76. Напряжения в бетоне на низовой грани плотины Курпайской ГЭС перед Сусамырским землетрясением: а – изменения УВВ и температуры воздуха, б – схема размещения приборов, в – изменение тензора напряжений

Изложенное позволяет сделать следующие основные выводы:

– арочные плотины наиболее чувствительны к геодинамическим влияниям из-за жесткого напряженного контакта с вмещающими горными породами. О силовом геодинамическом воздействии на них можно судить по изменениям длины хорд или сближению берегов, по характеру депланации, по плановым смещениям, векторы которых в значительной степени определяются не только геометрией сооружения и деформативностью береговых упоров, но еще литостатической неравномерностью берегов, ориентировкой собственных тектонических напряжений в береговых массивах пород и направлением ближайших разломов;

– при расчетах прочности и НДС высоких арочных плотин нет необходимости учитывать податливость береговых упоров, по Фогту, которая поглощается деформациями сжатия в створе. Возможное увеличение напряжений сжатия в арочном направлении от геодинамических воздействий (крип, унаследованные движения, давление от потенциально неустойчивых массивов, литостатической неравномерности) можно определять приблизительно по методу Терцаги–Динника. В период эксплуатации к полученным значениям следует прибавлять величину крипового давления от собственных тектонических напряжений в массиве, определенную экспериментально *in situ*, и гидростатическое давление обходной фильтрации.

– кроме проверки устойчивости упорных призм береговых примыканий со стороны нижнего бьефа необходимо проверять и контролировать устойчивость приплотинных береговых массивов со стороны водохранилища (особенно для плотин в суровом климате с большой призмой сработки), которые подвергаются разуплотнению и оказывают криповое давление на береговые части арочных плотин из-за снижения параметров сопротивления сдвигу, увеличивая арочное сжатие. Это обстоятельство следует иметь в виду при проектировании размещения КИА.

– сейсмометрическая сеть в сооружении и в берегах должна быть неотъемлемой частью КИА арочной плотины в комплексе с автоматизированными системами штатных наблюдений, включающих ближайший разлом.

5.2. Гравитационные плотины с объемным напряженным состоянием

Изложенные положения о геодинамическом влиянии на НДС арочных плотин распространяются в значительной степени и на распорные гравитационные плотины в узких ущельях, такие как плотины Токтогульской, Курпсайской, Кировской, Зейской и Бурейской ГЭС. В створе Токтогульской ГЭС в период изысканий тектонические напряжения в бортовых массивах горных пород были определены на уровне от 6,5 МПа в верхней части до 7–17 МПа в средней и нижней частях соответственно. По расчетам к проекту максимальные напряжения сжатия в низовом клине, у основания плотины, имели значение 2,4 МПа. Измеренные в бетоне левобережной секции Л-1 в 2002 г. напряжения сжатия того же направления имеют максимальную величину 3,8 МПа у левобережного примыкания в зоне призмы сработки. Это означает, что в зоне переменного уровня, между отметками 900 и 837 м, произошла разгрузка собственных тектонических напряжений. Однако расчет по гипотезе Терцаги–Динника показывает, что напряжения в скальном массиве берегов еще остаются выше измеренных в бетоне. Поэтому можно ожидать, что сжатие плотины вдоль створа будет возрастать, пока напряжения в скале и в бетоне не выровняются. Действительно, данные Лаборатории натуральных наблюдений ГЭС за период с 1992 по 2002 г. по телетензотрам показывают, что из 34 измерительных точек в 22-х точках сжимающие напряжения возрастают. По щелемерным наблюдениям в межсекционных швах следует, что в сжатых швах увеличивается сжатие, а в раскрытых уменьшается раскрытие. При измерении осадок в 2002 г. отмечен подъем в основании плотины более чем на 4 мм, что может означать пуассонову деформацию от крипового сжатия между берегами в результате литостатической неравномерности, обходной фильтрации и активной сейсмичности.

Расчетные напряжения сжатия в нижней части низовой грани Курпсайской плотины определены величиной 3,5 МПа. Фактическая измеренная величина достигла 11,5 МПа на верховой

границы центральных секций плотины. В нижней части плотины Курпсайской ГЭС в 1990 г. перед Сусамырским землетрясением напряжения сжатия в плотине между берегами увеличились с 0,8 до 2,2 МПа (рис. 76), что свидетельствовало о влиянии тектонических напряжений, направленных нормально к руслу р. Нарын.

На плотине Зейской ГЭС отвесы в правобережных секциях 10 и 17 за период с 1985 по 1989 г. отметили необратимое смещение к левому берегу на 1,5–2 мм. Под действием сейсмических нагрузок 1985 г. секция 43 сместилась к левому берегу на 4,5 мм на отм. 316 м. Напряжения продольного сжатия в оголовках контрфорсов между берегами достигают значений 5–7 МПа, что сопоставимо с максимальными напряжениями сжатия в плотине от гидростатической нагрузки. А по расчетам к проекту из условий плоской задачи сжимающие напряжения вдоль оси плотины теоретически должны быть равны нулю.

Геодинамическое влияние в виде крипа и медленных движений по нормали к руслу создает, с одной стороны, дополнительные запасы устойчивости гравитационных плотин на сдвиг, на действие сейсмических нагрузок и является фактором положительным, с другой стороны, дифференцированные вертикальные подвижки по берегам, смещения вдоль русловых разломов или дискретные блоковые движения в створе могут быть опасными для противофильтрационных уплотнений в конструктивных швах и подлежат контролю.

ГЛАВА 6 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧЕТУ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПЛОТИНЫ

6.1. Прогноз землетрясений с помощью идентификации комплекса предвестников в измерительных сетях плотин

Максимальное расчетное землетрясение по карте ОСР-97 является главной потенциальной опасностью для каждой плотины в сейсмическом районе. Отсюда возникает необходимость прогноза этой геодинамической нагрузки, которая следует из таблицы 17.

Таблица 17

**Изменения расчетной сейсмичности в районах
расположения крупных ГЭС по карте ОСР-97**

Объект	Нормативная сейсмичность		Уточненная сейсмичность (по ЦСГНЭО)
	При строительстве по проекту	По карте ОСР-97 (вариант С)	
Чиркейская ГЭС	7	10	9
Миатлинская ГЭС	7	10	9,5
Чирюртская ГЭС	7	10	9,5
Ирганайская ГЭС	7	10	8
Иркутская ГЭС	8	9	9
Братская ГЭС	–	6	–
Саяно-Шушенская ГЭС	7	9	8
Красноярская ГЭС	–	7	7
Зейская ГЭС	6	9	9
Бурейская ГЭС	6	8	8

Всего в России, по данным ЦСГНЭО, насчитывается 32 высоких плотины с возросшей оценкой нормативной сейсмичности по карте ОСР-97, в том числе для четырех плотин она стала выше на 3 балла, для 22-х плотин – на 2 балла [Савич, Бронштейн, Грошев, 2005].

Возможность оперативного (краткосрочного) прогноза землетрясений является предметом долголетних дискуссий. Более того, есть мнение о бесперспективности поиска и использования любых косвенных предвестников землетрясений для решения задачи прогноза. [Кондратьев, 1999]. В этом утверждении нам представляются некорректными два положения. Во-первых, непонятно, почему при решении столь важной задачи следует пропагандировать один метод в ущерб другому, когда существует общепринятое мнение о необходимости комплексирования методов (В. Н. Страхов, А. Н. Алексеев, Г. А. Соболев и др.). Во-вторых, инструментально и одновременно измеряемые деформации, параметры флюидного режима, смещения по разломам, сейсмометрические параметры неправильно было бы называть «косвенными предвестниками». Они являются прямыми индикаторами изменения поля тектонических напряжений перед толчком, никак не более косвенные, чем изменения скорости сейсмических волн как главный прогностический признак, предлагаемый О. К. Кондратьевым. Для больших плотин в зонах повышенной по сравнению с проектом расчетной сейсмичности такие научные дискуссии непродуктивны. Прогноз землетрясений для них – неотложная практическая задача, которую персонал ГЭС вынужден решать собственными силами и средствами в соответствии с требованиями закона о безопасности гидротехнических сооружений. Поэтому наиболее важным результатом проведенных исследований мы считаем доказанную возможность оперативного прогноза землетрясений с помощью действующих измерительных систем плотин.

Прежде всего возникает вопрос о масштабе этих возможностей, о суммарной площади в Северной Евразии, которая может

контролироваться плотинами как прогностическими полигонами. Наш опыт показывает, что влияние очаговых зон землетрясений и ареалы действия предвестников распространяются на значительные расстояния даже при магнитудах $M = 5-6$. На Братской ГЭС фиксировались предвестники и отклик КИА на землетрясения в Прибайкалье на расстоянии 600 км. На Саяно-Шушенской ГЭС также явно отмечено Алтайское землетрясение 2003 г. на расстоянии 390 км. На рисунках 77 и 78 показаны предвестники Алтайского землетрясения в дренажах левобережного примыкания плотины СШ ГЭС и в показаниях обратных отвесов с. 18 и 45, якоря которых расположены вблизи тектонических нарушений. Наконец, предвестники землетрясения Тахоку и зафиксированные пьезометрами Курильские землетрясения в основании Бурейской ГЭС дают право считать, что ареал распространения ГГД-предвестников от очагов с потенциалом $M = 8$ достигает 1800 км. Этот вывод корреспондируется с данными работ Сидорина А. Я. и Зубкова С. И. [Сидорин, 1991, Зубков]. На основе изучения откликов КИА плотин на дальние сейсмические события, можно утверждать, что каждая высокая плотина с крупным водохранилищем способна контролировать предвестники на всей водосборной площади своего водохранилища, которая объединена гидрографической и разломной сетью. Значения этих площадей и их сумма представлены в таблице 18. В настоящее время такая площадь составляет более 2-х млн км², в том числе более 1 млн км² в зонах 9- и 10-балльной сотрясаемости, что, по приблизительным подсчетам, составляет около 50 % сейсмоопасных площадей такой балльности по карте ОСР-97. С учетом водохозяйственных, строящихся и намеченных к строительству плотин эта сеть будет уплотняться, а площадь увеличиваться. Таким образом, предлагаемый метод прогноза является не локальным, а региональным, заслуживающим государственного внимания.

Обобщение полученных зависимостей времени появления самых чувствительных и надежных ГГД-предвестников T и прогнозного времени $T_{\text{п}}$ от магнитуды ожидаемого землетрясения

по измерениям на Саяно-Шушенской, Чиркейской и Зейской ГЭС (рис. 79) приводит к выводу о невозможности универсального подхода к прогнозу с помощью формул типа

$$\text{Lg } T = aM - b,$$

рекомендуемых некоторыми авторами. А применительно к оперативному краткосрочному прогнозу трудно говорить о возможности математической интерпретации. Весьма скудный статистический материал дает слабые корреляции. Зависимости, как правило, не являются линейными и получаются различными для различных регионов, что вполне естественно, поскольку

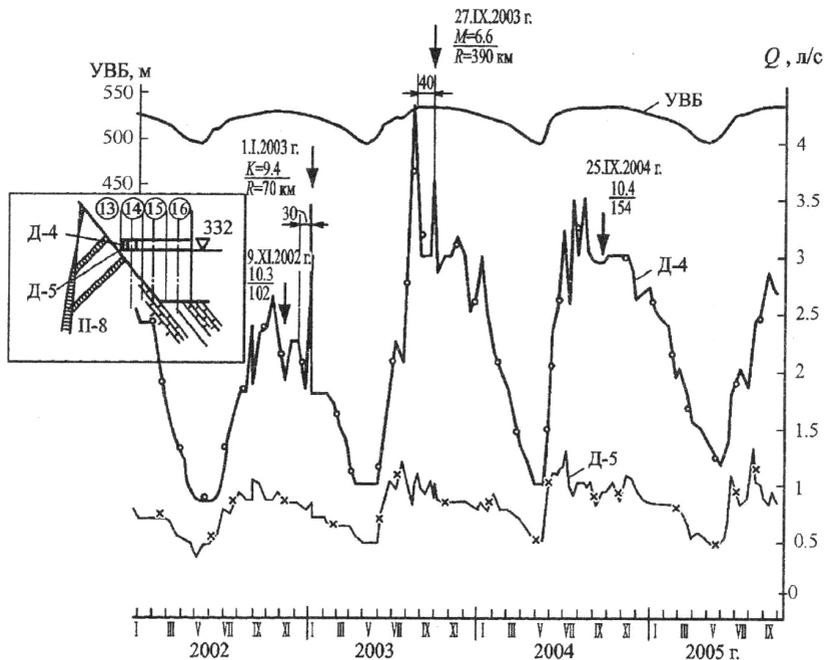


Рис. 77. Предвестники землетрясений в дебите дренажных скважин левобережного примыкания плотины Саяно-Шушенской ГЭС. На врезке приведена схема расположения дренажных скважин и трещин

**Перечень крупных плотин Северной Евразии
и контролируемые площади появления предвестников землетрясений
с помощью их измерительных систем**

Страна	Плотина ГЭС	Площадь водохранилища при НПУ, км ²	Максимальный напор, м	Площадь водосбора, км ²	Расчетная сейсмичность по карте ОСР-97
Россия	Саяно-Шушенская	621	220	179 900	9
	Братская	5 470	106	736 000	6
	Красноярская	2 000	101	288 200	5
	Иркутская	32 966	31	580 000	9
	Мамаканская	10,82	46,5	9 300	8
	Зейская	2 419	98,3	33 800	9
	Бурейская	740	128	65 200	8
	Колымская	440,7	119,3	61 500	9
	Чиркейская	42,5	205	12 784	10
	Миатлинская	1,54	60,4	13 033	10

	Чирютовская	7,3	42,5	13 340	10
	Ирганайская	17,6	200	7 320	10
Кыргызстан	Токтогульская	284,3	180	52 500	10
	Курпсайская	12	106	54 600	10
Узбекистан	Чарвакская	40,1	148	9 720	9
	Андижанская	57	99		10
Таджикистан	Нурекская	98	275	30 084	10
Грузия	Ингульская	13,5	410	3 170	10
Азербайджан	Мигечаурская	605	65	62 550	9

Итого: 45 846 2 213 001 км²
В том числе в зоне 10-балльных сотрясений 186 831 км²
В зоне 9-балльных сотрясений 927 470 км²

поскольку геологические, литологические, сеймотектонические условия различны, как различны и техногенные влияния. Возможно, что при более высоких магнитудах эти различия будут менее заметными. Для мелкофокусных возбужденных землетрясений существенное значение играет, вероятно, эпицен-

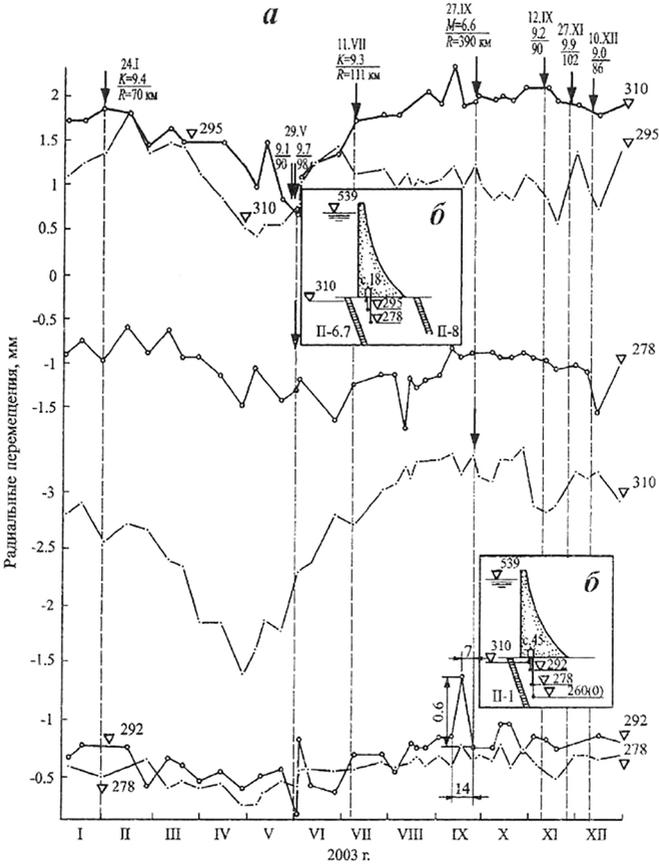


Рис. 78. Отклик обратных отвесов секций 18 и 45 плотины Саяно-Шушенской ГЭС на землетрясения $K > 9,4$ в 2003 г., в том числе на Алтайское 27.09, $M = 6,6$, $R = 390$ км;
a – схема размещения отвесов

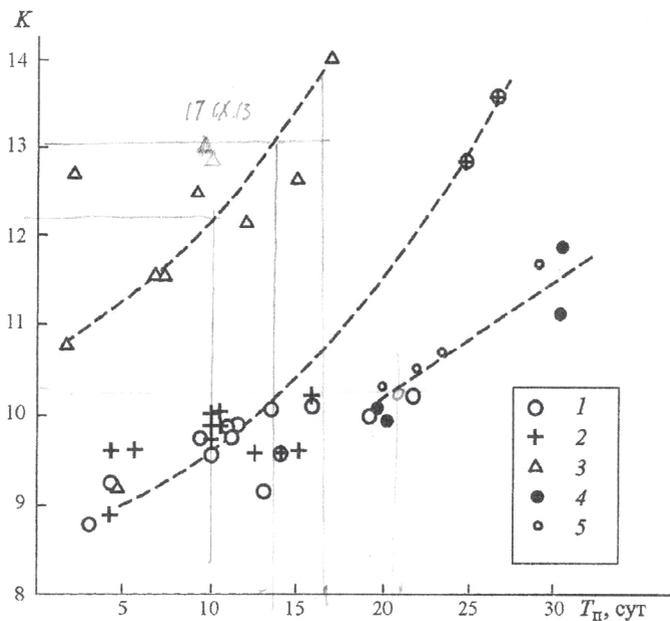


Рис. 79. Совмещенные графики зависимости прогнозного времени по ГГД-предвестникам для плотин Чиркейской, Саяно-Шушенской и Зейской ГЭС:
 1 – дрены левого берега СШ ГЭС, 2 – дрены правого берега СШ ГЭС,
 3 – коллектор № 2 Чиркейской ГЭС, 4 – дрены Зейской ГЭС,
 5 – пьезометры Зейской ГЭС

тральное расстояние и температурный фактор, отмеченный на Саяно-Шушенской и особенно на Миатлинской плотинах, где термальные воды близки к поверхности. Заметное изменение температурного режима дренажных вод подтверждает гипотезу В. С. Панфилова о возможной гидротермальной природе очагов землетрясений. Фазовый переход воды в пар при определенных РТ-условиях и взрывные выбросы в результате неустойчивой пароводяной конвекции удовлетворительно объясняют феномен многократной повторяемости и подобия землетрясений в ограниченном объеме горных пород и явление всплывания гипоцентров. Моделями разрушения (линейно-неустойчивого

трещинообразования, дилатантно-диффузионной, консолидационной) эти явления объяснить весьма трудно. Во всяком случае, о геотермальной модели можно уверенно говорить применительно к приводохранилищным районам с близким залеганием геотермальных вод.

Наиболее короткая жизнь предвестника отмечена в основании Чиркейской плотины, расположенной в наиболее сейсмоактивном регионе на сланцевых карбонатных породах с глинистыми прослойками и близким залеганием геотермальных вод. Для крепких пород в основаниях Саяно-Шушенской и Зейской плотин в диапазоне событий энергетического класса $K = 9-12$ зависимость $T_{\text{п}} = f(K)$ может быть интерпретирована прямой линией, но события более высокой энергии, $K = 13-14$, уже не подчиняются линейной зависимости. Возможно, это объясняется высокими собственными тектоническими напряжениями. Поиск корреляционных зависимостей прогнозного времени от энергии ожидаемого землетрясения $T_{\text{п}} = f(K)$ для других типов предвестников – геодезических, деформационных дает меньшие значения $T_{\text{п}}$, что свидетельствует о пониженной чувствительности, большей инерционности обратных отвесов и струнных телетензометров. Эти предвестники целесообразно использовать как уточняющие на более поздних этапах прогнозирования. Устойчивых корреляций между размером предвестника (амплитудой аномалии) и эпицентральным расстоянием не обнаружено. Связь предвестника с эпицентральным расстоянием является очень слабой.

Помимо упомянутых ранее в главе 6 экспериментов по практическому прогнозированию приведем примеры документального оформления практических прогнозов, выполненных на Чиркейской и Саяно-Шушенской ГЭС. На Чиркейской ГЭС эксперименты по практическому оперативному прогнозированию начаты в 1992 г., после тревожного обрушения правобережного массива под площадкой ОРУ в 1991 г. Всего было выполнено 7 прогнозов на толчки энергетического класса $K = 8-10$, которые можно признать успешными. Ниже приводятся примеры документального оформления прогнозов.

И. о. директора Чиркейской ГЭС Мутаеву Ш. А.

Докладная записка

Докладываю, что ежедневными измерениями обнаружены и идентифицированы следующие предвестники ожидаемого землетрясения:

1. Гидрогеодинамические: аномальный рост фильтрационных расходов в коллекторе № 1, в источниках ДЛ-4 и в торце штольни на отм. 220 м. на правом берегу. После спада от толчков 14.ІІІ.1999 отмечен подъем пьезометрических уровней в пьезометрах ПЗ-127, ПЗ-124, П-122 правого берега. Суммарный фильтрационный расход по плотине на 15.ІІІ составил 20,7 л/с против 18 л/с на ту же дату и при том же УВБ в 1998 г. Температура дренажных вод поднялась до 13 °С и выше против 12 °С, что свидетельствует о выделении глубинного тепла.

2. Деформационные: обратные отвесы ОО-1, ОО-5, ОО-6 показывают значительные флуктуации смещений (до 3 мм), преимущественно в сторону правого берега и в нижний бьеф, что может означать усиление пульсирующего крипа со стороны более высокого левого берега.

По ориентировочным подсчетам энергетического баланса нагрузок на земную кору в районе водохранилища, сработка уровня до отм. 325 м, которая может быть достигнута 17.ІІІ.1999 г., высвобождает энергию, эквивалентную энергии землетрясения $K = 12-12,5$ с интенсивностью сотрясения 4–5 баллов, в зависимости от глубины очага. Возможен рой толчков $K = 9-10$. Дата землетрясения – 18 марта с. г. (плюс-минус сутки). Прогноз будет уточнен после получения результатов измерений на Миатлинской ГЭС и получения сейсмологической информации с/с «Дубки».

Гл. н. с. ОИФЗ РАН, д. т. н. Марчук А. Н. 15.ІІІ.99 г.

И. о. директора Чиркейской ГЭС Мутаеву Ш. А.

Докладная записка

Докладываю, что ежедневными измерениями пяти контрольных параметров обнаружены и идентифицированы следующие предвестники ожидаемого землетрясения:

1. Гидрогеодинамические: аномальный рост фильтрационных расходов в коллекторах № 1 и № 2 после снижения 23.ІІІ.1999 г. соответственно с 4 л/с до 4,32 и с 7,77 до 8,67 л/с при снижении УВБ за этот период на 62 см.

2. Температурные: повышается температура дренажных вод контрольных источников в штольнях Чиркейской и Миатлинской плотин: т. 30 МГЭС с 9,4 до 10 °С, т. В-1 с 9 до 9,3 °С, т. «Веер у шахты» ЧГЭС с 12 до 12,2 °С.

3. Деформационные: с 23.ІІІ.99 изменили тренд графики обратных отвесов ОО-1 и ОО-6 ЧГЭС, прямой и обратный отвесы МГЭС.

4. Сейсмологические: по данным с/с «Дубки» с 21.ІІІ.99 по 25.ІІІ.99 не зарегистрировано событий энергетического класса более 8,2, хотя призма сработки водохранилища по объему составила около 50 млн м³, что эквивалентно потенциалу $K = 11$. По ретроспективному анализу графика фильтрационных расходов, создавшиеся условия соответствуют ожидаемому землетрясению $K = 10,5-11$, срок – 26.ІІІ. с точностью 12 часов.

Гл. н. с. ОИФЗ А. Марчук. 24.ІІІ.99 г.

По итогам четырех подряд подобных прогнозов составлен нижеследующий акт.

Акт Дагэнерго

На Саяно-Шушенской ГЭС эксперименты по прогнозированию начаты в 1994 г. Результаты первых четырех опытов были доложены на заседании Технического совета ОАО «Саяно-Шушенская ГЭС» и оформлены решением этого совета со следующим содержанием:

В соответствии с договором СШ ГЭС и ОИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН от 20 мая 1993 г. за период с 26 июля по 18 августа 1994 г., главным научным сотрудником ОИФЗ д.т.н. Марчуком А. Н. совместно с работниками ЛГТС и химлаборатории СШ ГЭС про-

ведены натурные эксперименты по регистрации и прогнозу землетрясений с помощью измерительных систем плотины.

Ежедневными измерениями дебита, температуры и химического состава воды контрольных дрен, опросом 3 раза в сутки датчиков системы автоматизированного контроля плановых совмещений были зафиксированы устойчивые тенденции в аномальных показаниях приборов, которые можно считать последствиями землетрясений.

Последующая проверка по данным сейсмостанции «Черемушки» подтвердила факт сейсмособытий 29 июля и 2 августа с. г. Аналогичным образом за 8 суток были предсказаны и землетрясения 5 и 10–11.08. Сейсмособытия с параметрами, близкими к предсказанным, также зарегистрированы сейсмостанцией. Происхождение указанных сейсмособытий необходимо уточнить в последующем.

Учитывая выводы двух ранее представленных отчетов ОИФЗ и результаты проведенных натурных экспериментов, Технический совет констатирует наличие признаков геодинамического влияния на плотину, не исключая, в частности, и возбужденную сейсмичность, а также необходимость учета в практике натурных наблюдений особенностей геодинамических воздействий.

Заслушав и обсудив доклад Марчука А. Н., Технический совет РЕШАЕТ:

1. Одобрить результаты проведенной работы с учетом замечаний, отраженных в отзыве.

2. Обратиться к руководству Минтопэнерго РФ с просьбой об организации на Саяно-Шушенской ГЭС геодинамического полигона с выделением на эти цели соответствующего бюджетного финансирования, в том числе и для оснащения исследований современной аппаратурой с необходимыми характеристиками.

3. Просить руководство ОИФЗ, Ленгидропроекта и Гидропроекта поддержать эту просьбу и оказать научно-техническую помощь в организации полигона.

Председатель технического совета В. А. Стафиевский.

Секретарь Т. Г. Балашкина.

Акты на последующие два прогноза, оказавшиеся также успешными, не были подписаны руководителем группы сейсмического контроля СШ ГЭС, т. к. предсказанные сейсмособытия совпадали по времени с промышленными взрывами в карьерах на расстоянии 80–100 км.

Проблему очистки каталогов сейсмособытий от промышленных взрывов впервые подняли Г. А. Гамбурцев, Е. И. Гальперина, Т. Г. Раутиан, А. А. Годзиковская [Годзиковская, 1995]. Проблема оказалась весьма актуальной для СШ ГЭС, окруженной многочисленными угольными разрезами, рудниками Кузбасса, месторождениями мрамора и объектами строительства. В этих условиях сейсмслужба СШ ГЭС приняла решение не учитывать сейсмособытия, происходящие в рабочее время. Однако на промышленные взрывы, например на взрывы в Тоштагольском руднике с весом одновременно взрываемого заряда в 700 тонн, все измерительные системы плотин откликаются как на природные землетрясения энергетического класса $K = 10$ и более с сопутствующими негативными последствиями. Дискриминация таких событий может составить ложную картину сейсмического благополучия. По нашему мнению, в переменном поле напряжений при изменениях УВБ до 1 м/сут подготовка сейсмических толчков идет непрерывно, и роль триггера может сыграть или критическое изменение УВБ или волна от промышленного взрыва. Если на аналоговых сейсмограммах взрыв и землетрясение можно различить, то на графиках измерительных систем плотин сделать это невозможно. К землетрясению, вызванному взрывом, следует относиться как к возбужденному землетрясению, одинаково вредному для плотины, как и от природного сотрясения. Более продуктивным является требование к горнодобывающим организациям максимально снизить сейсмический эффект от промышленных взрывов вблизи от гидроузлов высокой ответственности.

Полноценный прогноз землетрясений должен включать определение времени события с точностью до суток, энергии ожидаемого толчка и места очага. Первые два параметра определя-

ются по аналогам и корреляционным связям из длинного ряда наблюдений. При появлении предвестника с амплитудой более ранее наблюдаемых необходимо экстраполировать корреляции или искать аналог на других плотинах. Проблема места расположения очага решается труднее и ограничивается определением квадранта – правый–левый берег, верхний–нижний бьеф. Если близко расположен хорошо изученный активный сейсмогенерирующий разлом–сейсмогенератор, то задача упрощается. Весьма важно отмечать место появления первого предвестника, который обязательно приходит со стороны очага. Легче всего различаются правый–левый берег, поскольку в русле часто существует разрывное нарушение, которое разделяет предвестник по времени. Так, аномалии пьезометров на плотине Красноярской ГЭС перед землетрясением 27.10.2000 появились со стороны правого берега, со стороны очага, тогда как на левом никаких аномалий не было. Предвестники Алтайского землетрясения в дренажах плотины СШ ГЭС раньше появились на левом берегу, со стороны Алтая. Грузино-Дагестанское землетрясение 2013 г. предварялось импульсным повышением арочных напряжений в левобережном примыкании плотины, обращенном в сторону Грузии. Синхронными наблюдениями на Бухтарминской и СШ ГЭС положение очага можно было бы определить достаточно точно.

В настоящее время на основании имеющегося опыта, закона повторяемости землетрясений можно предложить следующий перечень мер и алгоритм прогноза землетрясений с помощью измерительных систем больших плотин [Марчук, Дурчева, Савич и др., 1996] (рис. 80).

1. Ретроспективный анализ результатов натуральных наблюдений совместно с региональным каталогом сейсмособытий. Выбор измерительных систем и датчиков, наиболее чувствительных к геодинамическим воздействиям. Как правило, это ближайшие к токтоническим нарушениям дренажные, пьезометрические скважины и обратные отвесы. К этой же группе можно отнести некоторые прямые отвесы, деформометры на контактах сооружения с основанием, щелемеры в зонах влияния тектонических



Рис. 80. Алгоритм прогноза землетрясений с помощью измерительных систем плотин

нарушений и крупных трещин. Выбор времени наблюдений. Как правило, это периоды экстремальных УВБ.

2. Автоматизация выбранных систем и датчиков или установка ежедневного режима наблюдений по ним в периоды сейсмической активности и быстрых изменений УВБ. Геодезические наблюдения на ближайшем разломе.

3. Синхронизация ежедневных или автоматизированных наблюдений с сейсмометрической аппаратурой плотины. Оперативная связь с ближайшей сейсмостанцией ГС РАН.

4. Фиксация аномальных отклонений измеряемых параметров от известных зависимостей, связанных с гидростатическим давлением и температурой наружного воздуха, превышающих ошибки измерений и имеющих динамический остропиковый характер флуктуаций. Фиксируется время, место и параметры аномалий. Проводится комплексный анализ аномалий.

5. Момент изменения тренда аномалии считается точкой начала отсчета прогнозного времени до ожидаемого землетрясе-

ния T_{II} . Проверяется наличие аномалий и изменение их тренда по всем измеряемым параметрам, по измерениям на соседних плотинах, по общим сейсмологическим условиям региона на основе данных сейсмостанций ФССН. По данным проверки, уточняется осреднением значение T_{II} . Направление на очаг принимается по месту появления первых предвестников.

6. Поиск аналогичных аномалий из ретроспективного ряда наблюдений в сходных условиях и определение T_{II} по аналогам (от точки изменения тренда до прогнозируемого срока землетрясения).

7. Уточнение прогноза, полученного из ретроспективного ряда по внешним условиям и новым, более частым измерениям наиболее надежных предвестников. Уточнение в сторону уменьшения T_{II} обуславливается природными аномалиями – осадками, более низкой температурой воздуха, резким изменением атмосферного давления, большей скоростью наполнения водохранилища, более высокой интенсивностью изменения измеряемого параметра, нарастающей сейсмической активностью в регионе.

8. Объявление прогноза и предварительной сейсмической тревоги. Ожидание форшока, продолжение контроля предвестников.

9. После форшока (первого ощутимого толчка) – объявление сейсмической тревоги, уточнение направления на очаг по азимуту форшока.

10. Фиксация всех измеряемых параметров во время толчка.

11. Обследование последствий землетрясений, пополнение банка данных, анализ ошибок.

В виде структурной схемы алгоритм краткосрочного прогноза землетрясений представлен на рисунке 80.

По наблюдениям, наиболее опасные возбужденные землетрясения возникают при быстром наполнении водохранилища со скоростью 1 м/сут и более, а также в период сработки, в марте-апреле для плотин России. В первом случае опасно совпадение сейсмической нагрузки с высоким паводком и форсированием УВБ. Во втором случае при низком УВБ возможны нарушения контактов плотины с основанием, нарушение водонепроницаемости

швов, трещинообразование на низовой грани. В любом случае возбужденная сейсмичность снижает качество и долговечность сооружения, активизирует потенциально неустойчивые массивы. Наиболее сильные природные землетрясения чаще происходят в периоды наполненных водохранилищ.

Практическое краткосрочное прогнозирование землетрясений с помощью измерительных систем плотин целесообразно отработать в сейсмичных регионах с большим количеством плотин, например в Дагестане или на каскаде Нарынских ГЭС в Кыргызстане, что было бы логичным продолжением начатых исследований.

6.2. Рекомендации по предотвращению ущерба от геодинамических воздействий на плотины

Указанная проблема прежде всего относится к существующим гидротехническим сооружениям. Натурными наблюдениями на них с привлечением всех действующих средств измерения должны быть выявлены потенциальные опасности, количественные характеристики действующих сил для проведения поверочных расчетов на устойчивость и прочность. Необходимость поверочного расчета связана с главными опасностями от геодинамических воздействий, в первую очередь на плотины в сейсмоактивных областях, где расчетная сейсмичность повышена картой ОСР-97.

По степени их влияния на основе имеющегося опыта следовало бы выделить:

– тектонические движения по разломам, пересекающим створы плотин или близко к ним расположенным, например плотина Саяно-Шушенская ГЭС, крип при разновысоких берегах (например, Чиркейская, Бурейская плотины). Нарушение цементационных завес;

– оползни (плотины Чиркейской, Миатлинской, Бурейской ГЭС), потенциально неустойчивые массивы, состояние откосов, обрушения (камнепады), что характерно для всех плотин в сейсмоопасных регионах;

– длительные процессы изменения параметров сопротивления сдвигу пород основания береговых примыканий и откосов в результате водонасыщения, химической суффозии, изменений УВБ и температуры, блоковые подвижки, развитие обходной фильтрации;

– влияние переменных гидрогеодинамических и гидрогеохимических полей, карсты, абразия и эрозия, размывы за водосливами и водосбросами в зонах тектонических нарушений;

– возбужденная сейсмичность при первом наполнении водохранилища, при форсированных УВБ и пропуске высоких паводков;

– временное увеличение взвешивающего и фильтрационного давления в основании и в береговых примыканиях плотин в периоды геодинамической нестабильности и сейсмической активности с уменьшением запаса устойчивости на сдвиг;

– возможное увеличение ФПУ нагонной волной в период природного или возбужденного землетрясения.

Прежде всего следует отметить, что все эти семь задач на стадии проектирования не поддаются точному аналитическому расчету, потому что геодинамическое воздействие в значительной степени носит случайный характер. По нашему мнению, некоторое увеличение разделенных коэффициентов запаса в существующей методике расчета по предельным состояниям для особого сочетания нагрузок вполне снимает большинство перечисленных проблем. На основе накопленных материалов наблюдений можно считать достаточным увеличение коэффициентов надежности по нагрузке γ_f до 1,1 или коэффициент условий работы принять как для береговых примыканий арочных плотин $\gamma_{cl.} = 0,75$.

Наибольшую опасность представляет собой возможность тектонического движения по разлому под плотиной, подобного тайваньскому случаю с плотиной Шиканг. Такой чрезвычайно редкий случай может быть исключен тщательностью изысканий и изучения активности разломов или компенсирован специальными конструктивными швами.

Оползни, подобные миатлинскому, и обрушения береговых склонов (Вайонт, Чиркей) возможно исключить изысканиями для выбора оптимального расположения створа, в противном случае снизить опасность постоянными наблюдениями, предварительным обрушением или искусственным закреплением потенциально неустойчивых горных массивов.

Геомеханические задачи 3, 4 и 5 могут быть решены аналитически в рамках поверочных расчетов на базе материалов длительных натуральных наблюдений с применением максимально зафиксированных снижений параметров сопротивления сдвигу, увеличения эпюры противодавления и увеличения ФПУ в период сейсмической активности. При наличии математической модели сооружения этот процесс является естественным и перманентным, соответствующим требованиям стандартов. Уточнению подлежат расчеты на устойчивость и прочность сооружения, в случае необходимости — раскрытие трещин, и в первую очередь в основании напорной грани на контакте скала—бетон. Именно эта зона взаимодействия сооружения с основанием является наиболее ответственной и уязвимой.

Для этого случая можно рекомендовать методику, программу и номограммы МГСУ [Марчук М. А., 1994] с учетом расчетной сейсмической нагрузки как квазистатической с вытекающими последствиями по увеличению до полного фильтрационного противодавления. При таких условиях устойчивость на сдвиг проверяется по номограмме на рисунке 81 для гравитационных плотин высотой порядка 100 м на длине раскрытой трещины λ_T в зависимости от заложения низовой грани плотины m , расстояния до дренажа λ_D и модуля деформации пород основания E_0 . При этом длина трещины не зависит от высоты плотины.

Медленные геодинамические движения и воздействия на плотины, особенно в узких створах с разновысокими берегами, проявляются в увеличении напряжений сжатия вдоль створа (арочных σ_a или σ_z при расчетах по условиям плоской задачи).

Величину этих усилий можно определять натурными наблюдениями по соответствующим образом ориентированным телендозометрам в розетках в бетоне или экстензометрам в берегах.

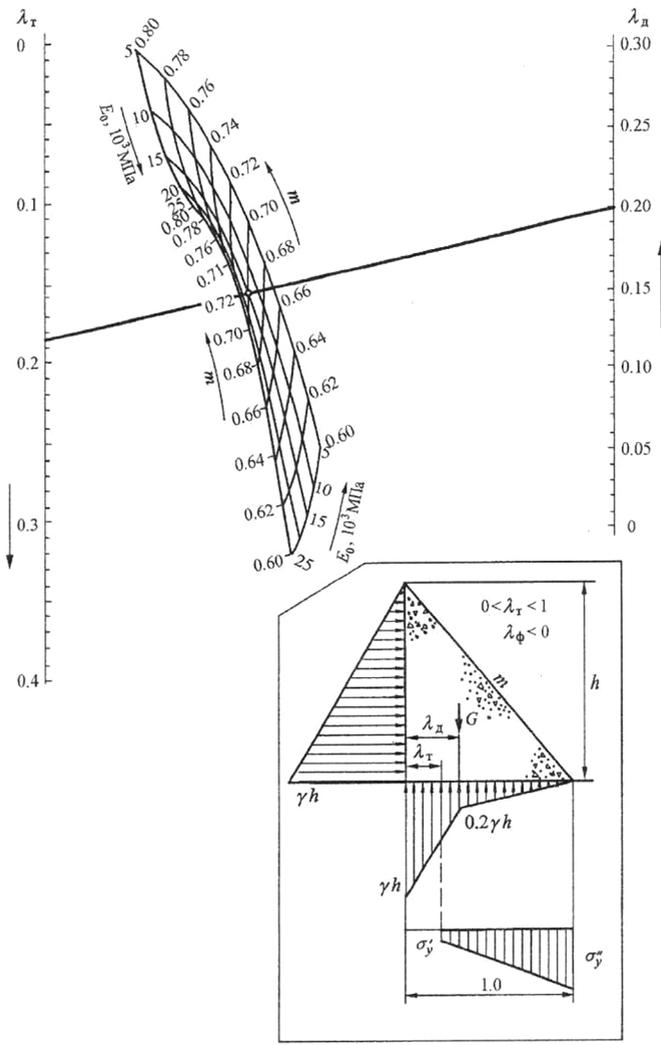


Рис. 80. Номограмма для определения относительной длины контактной трещины λ_r в основании гравитационной плотины в зависимости от наклона низовой грани m , модуля деформации основания E_0 и расстояния до дренажа λ_d , a – расчетная схема плотины с контактной трещиной, эпюрой противодавления по СНиП и эпюрой нормальных напряжений в основании

Такие приборы целесообразно закладывать у более высокого берега, ближе к тектоническим нарушениям. Суммарное воздействие может быть определено интегрированием поля точек измерения по площади поперечного сечения секции плотины, на основе натурных наблюдений после адаптации сооружения к створу. Примером может служить картина приращений арочных напряжений в плотине СШ ГЭС через 6 лет после достижения проектной гидростатической нагрузки и трехлетней адаптации к вмещающей геологической среде (рис. 82). Следует заметить, что приращения напряжений увеличивались и после 1996 г., т. е. процесс уточнения является перманентным.

Геодинамические воздействия могут представлять опасность для контрфорсных и арочных плотин и должны контролироваться в обязательном порядке, особенно в периоды сейсмической активности. При этом важно следить за возможными местами концентрации напряжений в зонах влияния разломов и крупных трещин, штаб, резких изменений геометрии профиля плотины, в местах сопряжения отдельных частей сооружения, где могут развиваться предельные состояния.

На стадии проектирования размеры этого потенциального воздействия вдоль створа можно приблизительно определять по формуле Терцаги–Динника

$$\Delta\sigma_z = [v/(1 - v)] \cdot \Delta\sigma_h + \Delta W, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma_z$ – дополнительное давление со стороны берегового при-
мыкания вдоль створа на глубине h от поверхности, v – коэффициент Пуассона, σ_h – вертикальные напряжения в массиве горной породы на глубине h от поверхности, ΔW – разница в гидростатическом давлении обходной фильтрации между берегами.

При снижении параметров сопротивления сдвигу пород во времени поверочный расчет плотины на устойчивость следует вести с учетом напряжений σ_z по формуле (2) и давления береговых потенциально неустойчивых массивов, которые повышают устойчивость плотины.

В соответствии с действующими правилами эксплуатации электростанций, после каждого землетрясения интенсивностью

5 и более баллов производится контроль всех измеряемых параметров и, в случае необходимости, поверочный расчет на прочность и устойчивость повторяется.

Увеличение взвешивающего давления по основанию и гидростатического давления в береговых примыканиях в результате сейсмической нагрузки можно не учитывать из-за кратковременности действия. Если же дополнительное давление возникает в зоне крупного тектонического нарушения, примыкающего к плотине, то оно подлежит учету. В суровом климате, при

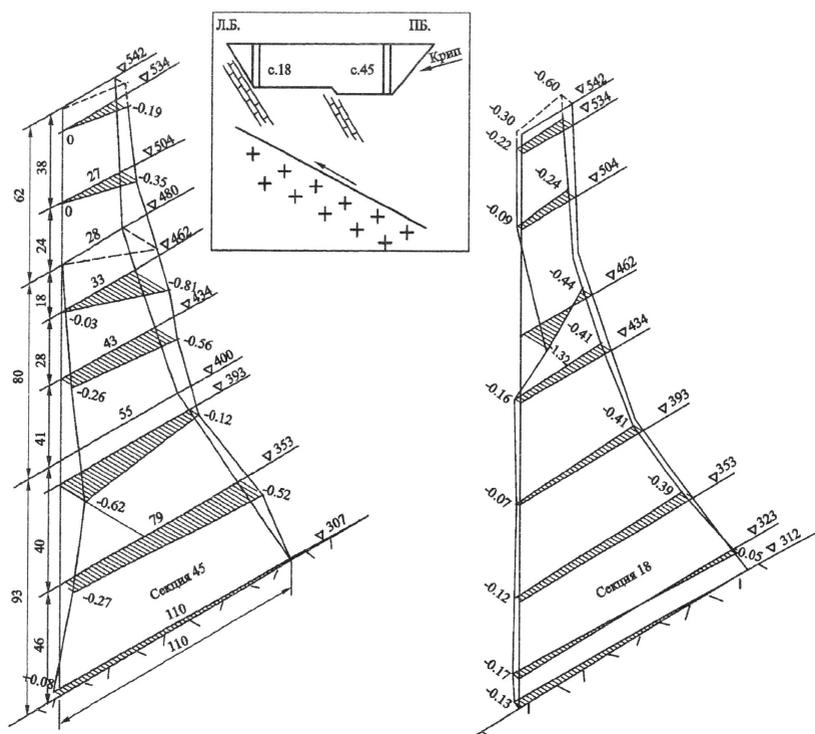


Рис. 82. Эпюры приращений арочных напряжений в секциях 18 и 45 плотины Саяно-Шушенской ГЭС за период с 1993 по 1996 г. от геодинамического воздействия — крипового давления со стороны правого берега, разгрузки тектонических напряжений и унаследованного движения интрузии гранитов

плохом дренаже, необходимо принимать во внимание гидростатическое давление вдоль створа от действия обходной фильтрации в зимнее время или принимать меры по улучшению дренирования и повышению водонепроницаемости пород, как это сделано в правобережном примыкании плотины Зейской ГЭС.

В строительный период обязательно следует признать удаление неустойчивых откосов в примыканиях плотин, оборку потенциальных камнепадов в верхнем и нижнем бьефах, устройство защитных стенок.

Наиболее эффективным способом уменьшения геодинамических воздействий на существующие сооружения является напряженная анкеровка с обетонированием и дренированием откосов в зоне примыкания плотин к бортам, подавление обходной фильтрации по аналогии с практикой, применяемой в Японии.

Из ряда рассмотренных российских плотин следовало бы выделить, по нашему мнению, три объекта, которые нуждаются в принятии мер по усилению их геодинамической устойчивости. К ним относятся СШ ГЭС, плотина Миатлинской ГЭС и Чиркейская ГЭС. Подлежит проверке устойчивость контрфорсной плотины Зейской ГЭС с учетом размыва в нижнем бьефе и повреждения раздельной стенки. При разработке мер по нейтрализации геодинамических воздействий полезно учесть и зарубежный опыт, изложенный в бюллетенях ICOLD.

6.3. Рекомендации ICOLD по проектированию плотин, устойчивых к геодинамическим нагрузкам

Принципиальные подходы ICOLD к проблеме взаимодействия плотин с земной корой заключаются в следующем [ICOLD Bulletin, 112, 1998]. Считается, что большинство существующих плотин запроектированы на основе устаревших методов и действительная степень их сейсмостойкости неизвестна. Некоторые из них могут быть небезопасны. Измерения последних лет показывают, что при магнитудах $M = 6 \div 6,5$ наблюдались ускорения до $1,0 g$, тогда как при квазистатических методах проектирования использовались значения ускорений порядка $0,1 g$. ICOLD

исходит из того, что при определенных условиях створы плотин могут размещаться в сейсмичных регионах с потенциалом $M = 8$ по шкале Рихтера, с ускорениями до $1,0 g$ и неглубоких эпицентрах, при соблюдении изложенных ниже условий.

Главные опасности для надежности плотин представляют собой активные тектонические разломы, пересекающие створ или расположенные вблизи створа. Они являются потенциальными генераторами землетрясений и криповых движений. Обширные статистические материалы натуральных наблюдений убеждают в том, что лишь малое количество плотин были подвержены прямым воздействиям криповых движений коры и разрывов разломов в основаниях, а также разрушениям в результате землетрясений. Тем не менее даже очень редкие случаи повреждения плотин от геодинамических воздействий обязывают искать приемлемые решения для строительства эффективных типов плотин, способных сопротивляться сильным движениям в основании. Тем более что гидротехникам приходится осваивать все более сложные в тектоническом отношении створы в горах и сейсмичных регионах, а число плотин неуклонно возрастает. Створ должен выбираться главным образом по условию тектонической стабильности. Это значит, что решение о выборе створа принимается только после оценки степени активности пересекающего створ или ближайшего разлома, его способности к проявлению разрывов или сдвигов в течение срока жизни плотины. Таким считается разлом, идентифицированный и определенный на местности, заложенной в голоцене (11 000 лет тому назад), имевший подвижки в четвертичном периоде. Учитывается фрактальная кинематика разлома: нормальный разрыв, надвиг, сбросо-сдвиг. Поднятое крыло надвига или опущенное крыло сбросо-сдвига существенно ограничивают поле негативного влияния разлома (Сан-Андреас). Это влияние проявляется:

- активизацией сейсмичности (в том числе возбужденной) с передачей сотрясений на сооружения;
- гидрогеологическим воздействием, включая возможность опустошения водохранилища;

- неустойчивостью откосов;
- крипом с возможностью действия в створе плотины;
- движением по разлому в основании плотин с ущербом для безопасности.

Исследование активности разломов начинается с изучения сеймотектоники региона в радиусе 15–200 км от створа, более подробными исследованиями в радиусе 50 км, детальным изучением разломов и тектонических нарушений, пересекающих створ. Для этой цели используются палеосейсмологические методы, анализ аэрофотосъемок, геоморфологический и сейсмологический анализ, геологические изыскания, геодезические наблюдения. Строго рекомендуется установка сейсмостанций и геодезических знаков до начала строительства и минимум за два года до заполнения водохранилища. Рекомендуемая документация на створ плотины включает: детальную карту разрывов с классификацией по длине, кинематике, хронологии и активности; карту эпицентров с магнитудами, интенсивностью сотрясений и глубиной гипоцентров, сейсмологическую карту ускорений и частот, неотектоническую карту блоков и дифференцированных движений с изолиниями интенсивности подвижек, карту активных и потенциальных оползней в масштабах от 1:5 000 до 1:50 000.

За последние 150 лет отмечены случаи подвижек в 200 разломах. Возможно, что во многих разломах смещения были не замечены. Опасность смещений определяется кинематикой разлома: в случае нормального разрыва с возможностью растяжения в земной коре и теле плотины створ следует считать неприемлемым. При сбросо-сдвиге и надвиге опасность значительных горизонтальных смещений невелика, можно считать возможным размещение плотин по соседству с разломом, как в случае Кристалл-Спрингс у разлома Сан-Андреас. Взброс, как при Аляскинском (1964 г.) и Чилийском (1971, 1985 г.) землетрясениях, вызывает комплексные разрушения, такой створ неприемлем.

Разрывное нарушение – это не единственная форма реализации тектонических напряжений. Чаще тектонические напряжения развиваются в форме крипа. Криповые движения охватывают большие блоки земной коры и включают различные

компоненты тензора напряжений. Если плотина размещена целиком в таком блоке, то проблем не возникает. Они появляются, когда плотина находится у границы мобильного блока и локальное воздействие крипового движения направляется на часть конструкции плотины. Такой случай имеет место на плотине Байна-Башта (Югославия), где пришлось усилить две левобережные секции. Если скорость дифференцированных движений по разлому высока, такой створ должен исключаться из рассмотрения. Когда разлом пересекает створ плотины, приходится отвечать на два вопроса – «активен ли разлом?» и «какие смещения можно ожидать в разломе?». Ответ на первый вопрос содержится выше, а для ответа на второй привлекаются известные зависимости между длиной разлома, магнитудой и смещением:

$$M = a + b \lg L,$$

$$M = c + d \lg D,$$

где L – длина разлома, D – смещение в разломе, M – магнитуда по Рихтеру. Подобным образом $\lg D = e \lg L$ есть отношение между смещением D и известной величиной L . Постоянные a , b , c , d и e определяются итерациями с использованием регрессионных уравнений наименьших квадратов по M и логарифмической зависимости параметров разлома. По полученным значениям смещений D оценивается возможность создания конструкции и типа плотины, способных абсорбировать, поглотить такие величины смещений без ущерба для надежности. В этих случаях предпочтительными являются грунтовые плотины с развитыми противофильтрационными элементами.

Подчеркнуто, что при выявленной возможности значительных подвижек по разлому лучше отказаться от такого створа и искать менее опасную альтернативу. Нет плотин, которые были бы запроектированы на поглощение разломных подвижек и выдержали такое испытание.

Цитированное руководство иллюстрируется случаями современной тектонической активности в створах плотин. Приводим наиболее характерные из них.

В зоне влияния разлома Сан-Андреас (США, Калифорния) грунтовые плотины Сан-Андреас, Кристалл-Спрингс, Хегбен (высотой до 30 м), гравитационная плотина Нижняя Кристалл-Спрингс (43 м) перенесли сильные землетрясения с магнитудами от $M = 7,1$ в 1951 г. до $M = 8,6$ в 1906 г. при полных водохранилищах. Осадка гребней достигала 2,5–3 м, через плотину Хегбен был поверхностный перелив. В результате криповых подвижек по разлому и суффозии, в 1963 г. разрушилась грунтовая плотина Болдуин-Хилл.

Облегченная гравитационная плотина Байна-Башта, высотой 90 м, длиной 450 м, со спаренными контрфорсами, расположенная на известняковой сланцевой антиклинали в долине р. Дрины, получила необратимые тангенциальные (вдоль створа) смещения в сторону левого берега более 52 мм. Две растрескавшиеся секции левобережного примыкания пришлось усилить железобетонной плитой с напряженной анкерровкой. Причиной нарушения был крип под давлением правобережного хребта Тара, разлом на левом берегу и возбужденная сейсмичность. За 30 лет эксплуатации плотины было записано около 70 толчков с магнитудами от $M = 2$ до $M = 4,7$ в районе с радиусом 30 км от плотины. Процесс геодинамического влияния продолжается, не исключены новые ремонтные работы.

Арочная плотина Мратинье (Югославия) на р. Пива высотой 220 м построена на прочных известняках с развитой системой разломов. Сейсмический мониторинг, организованный за 3,5 года до заполнения водохранилища, обнаружил кустовое расположение эпицентров вдоль линии главного разлома по руслу реки и правому берегу. Водохранилище Мратинье вызвало возбужденную сейсмичность, увеличило число толчков и их магнитуду $M = 4,1$ в мае 1978 г. Все ближайшие гипоцентры были очень мелкими. Наиболее сильный толчок последовал сразу за первой сработкой водохранилища и сопровождался поверхностными нарушениями и новыми оползнями вдоль линии главного разлома. В последующие годы сейсмическая активность вернулась к обычному для региона уровню. Но в 1994 г. при быстрой сработке

и последующем наполнении по требованиям энергосистемы феномен возбужденной сейсмичности проявился вновь с пиковой магнитудой $M = 3,8$ в мае 1994 г. Очаги вновь группировались вдоль главного разлома, были неглубокими и вызвали такие же последствия, как в 1978 г. Плотина не пострадала.

Каменнонабросная плотина Матахина в Новой Зеландии высотой 80 м с центральным суглинистым ядром, расположенная у разлома Эджекумбе, в 1987 г. перенесла сильное землетрясение $M = 6,3$ с ускорением на гребне до 0,42 g. Поврежденное при этом трещинами и суффозией ядро было восстановлено в 1988 г. Для обеспечения безопасности плотины проведен контрольный расчет на магнитуду 7,2 со смещениями 2,7 м горизонтально и 1,3 м вертикально. По результатам расчета было принято решение об усилении, что потребовало дополнительной отсыпки 5,5 млн t^3 грунта в низовую призму и устройства четырехслойного фильтра с дренажом общей шириной 5 м. Считается, что такое усиление обеспечит самозалечивание при возможных нарушениях.

Анализ повреждений плотин после 12 катастрофических землетрясений – Сан-Андреас 1906, Канто 1923, Санта-Барбара 1925, Керн-Конти 1952, Хебген 1959, Такаши-Оки 1968, Сан-Фернандо 1971, Чили 1971 и 1985, Мексика 1979, 1981 и 1985, Эджекумбе 1987 г. с магнитудами от $M = 6,3$ (Санта-Барбара) до $M = 8,3$ (Сан-Фернандо) привел к следующим выводам:

1. Земляные плотины неудовлетворительно сопротивляются сильным движениям земной коры. Это в первую очередь относится к старым, плохо уплотненным, намывным сооружениям – плотинам и хвостохранилищам на мягких основаниях. Большинство грунтовых плотин, построенных в последние десятилетия, с высоким качеством уплотнения на скальных основаниях, имели минимальные повреждения.

2. Каменно-набросные плотины, особенно с бетонными и асфальто-бетонными экранами, хорошо сопротивляются сейсмическим нагрузкам.

3. Наиболее сейсмостойкими являются бетонные плотины всех типов. В областях с высокой сейсмичностью предпочтительны арочные плотины.

Бетонные плотины всех типов (арочные в особенности) отличаются высокой сейсмостойкостью. Нет примеров сколько-нибудь значительных повреждений арочных плотин даже при экстремальных ускорениях, таких как на плотине Пакойма высотой 113 м (землетрясение Сан-Фернандо 1971 г., $M = 6,5$, ускорение $0,7 \div 1,25 g$).

Рекомендуемые детали проектирования арочных плотин:

- совершенствование и развитие геометрии (симметричность, но не обязательно);
- равномерное непрерывное нагружение основания при формировании контакта бетон-скала;
- ограничение длины по гребню;
- обеспечение сжатия в швах с адекватным сцеплением;
- улучшение динамического сопротивления и консолидации скального основания его бережной подготовкой, замена плохой скалы бетоном, цементация;
- обеспечение хорошо подготовленного подъема уровня бетона с максимальным ограничением растягивающих напряжений, включая плотины из укатанного бетона;
- минимизация объемов в верхней части плотины. Для других типов бетонных плотин дополнительно рекомендуется избегать концентрации местных напряжений и минимизировать влияние несплошностей. Для контрфорсных плотин – учитывать их чувствительность к сотрясениям вдоль створа. При строительстве комбинированных плотин (бетонная с земляной или каменно-набросной) наибольшее внимание следует уделять грунтовым сооружениям и их сопряжениям с бетоном. Для этой цели рекомендуется применение пластичных материалов, широких фильтров, тщательное уплотнение с обеспечением совместной работы элементов, при всех случаях в проектах сейсмостойких плотин необходимо учитывать возможность оползней и обрушений в водохранилище с возникновением волны всплеска, контроль за возбужденной сейсмичностью в период наполнения водохранилища, анализ последствий, перенесенных землетрясений с накоплением банка данных.

Проектирование земляных плотин

Землетрясением в Кобе (Япония) 17 января 1995 г. с магнитудой $M = 6,9$ были разрушены полностью три малые земляные плотины старой постройки в эпицентральной зоне. Бетонные плотины практически не пострадали. Во время землетрясения в Канто в 1923 г. была частично разрушена земляная плотина Оно высотой 40 м, включая разрыв длиной 21 м, трещины шириной до 25 см и длиной до 60 м с местными оползнями до 18 м длиной на низовом откосе. Серьезные повреждения грунтовых плотин описаны после землетрясений Санта-Барбара (США) в 1925 г., в Чили в 1971 и 1985 г., в Мексике 1979, 1981 и 1985 г. Анализ этих случаев и квалифицированные инструментальные записи позволили сформулировать основные требования к особенностям проектирования сейсмостойких грунтовых плотин. Главная опасность динамической нагрузки для таких сооружений – размыв через основание или неуплотненный материал.

Основные рекомендации по проектированию сводятся к следующему:

- основание должно быть подготовлено до очень плотной сохранной скалы или грунты основания должны быть уплотнены до полной водонепроницаемости;
- все зоны плотины должны быть тщательно уплотнены;
- основание в зоне ядра должно быть горизонтальным или слабо наклонным в верхний бьеф. В глубину береговых примыканий не менее чем на 30 метров основание должно иметь водонепроницаемый контакт без осадок отсыпаемого материала;
- форма основания и ядра на контакте не должна иметь резких входящих углов. Сквозные наклоны основания, пересекающие зону ядра, должны иметь заложение не круче 4:1 от верхового до низового откоса и предпочтительно 2:1 вдоль продольной оси плотины для предотвращения тенденции сквозных трещин;
- все набросные плотины и специальные однородные насыпи должны иметь мощные системы внутреннего дренажа для предотвращения фильтрации и суффозии через сквозные трещины

при землетрясениях и запроектированные ремонтные мероприятия на случай возникновения трещин при сотрясениях;

- широкие зоны фильтров и дренажей должны быть использованы для самозалечивания сквозных трещин при землетрясениях. Свойством самозалечивания должны обладать материалы напорного откоса и ядра;

- контакт ядра с береговыми примыканиями должен быть уширенным для увеличения пути фильтрации;

- «хрупкий» или водонепроницаемый материал не должен использоваться в насыпях или должен смешиваться с более пластичными грунтами, которые более устойчивы к сотрясениям;

- для компенсации возможных осадок и залечивания трещин во время землетрясения следует иметь запас материала на гребне, который превышал бы максимально возможный уровень воды. Запас должен быть и по ширине гребня, где возможны сквозные трещины и суффозия.

Изложенные подходы международного гидротехнического сообщества, выработанные с участием представителя России А. Н. Марчука, полностью применимы в отечественных условиях и должны быть отражены при уточнении нормативных документов. Следует оговорить, однако, необходимость учета климатических особенностей нашей страны. Так, у сибирских (Саяно-Шушенская) и высокогорных (Гунибская) арочных плотин при высоких призмах сработки недостаточно изученным является воздействие промерзающих со стороны верхнего бьефа береговых упорных массивов. При разуплотнении и снижении параметров сопротивления сдвигу они могут оказывать криповое давление на береговые секции плотины, увеличивая арочное сжатие после сработки водохранилища в зимнее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа имеет два аспекта. Первый, наиболее актуальный, – обеспечение технической, экологической и социальной безопасности крупных гидроузлов в районах с повышенным уровнем сейсмической опасности по карте ОСР-97. Этот аспект имеет прикладной характер и связан с необходимостью совершенствования расчетов и изысканий, нормативных документов, учитывающих геодинамические воздействия. Второй аспект отражает интересы фундаментальных наук о Земле – использование больших бетонных плотин в качестве существующих геофизических полигонов для изучения вариаций локальных геофизических полей в районах расположения высоконапорных плотин для отработки практических, инструментальных методов краткосрочного прогноза землетрясений, изучения механизма возбужденной сейсмичности. При этом должна рассматриваться единая природно-техническая система – «вмещающий геоблок – плотина–водохранилище».

В период эксплуатации большие высоконапорные плотины на скальных основаниях с крупными водохранилищами, передающие усилия на берега, испытывают геодинамические воздействия, фиксируемые измерительными системами плотин. Особенно активно геодинамические нагрузки проявляются в сейсмичных орогенных областях в виде природной и возбужденной сейсмичности, медленных тектонических движений, оползней, потенциально неустойчивых массивов и обрушений, карстов, пульсаций противодавления, переменных гидрогеодинамического, температурного и геохимического полей. Эти воздействия не предусмотрены строительными нормами и правилами, кроме одной сейсмической нагрузки расчетной интенсивности по карте ОСР-97 без учета возможности повторных сильных автershоков сопоставимой энергии и большого количества толчков меньшей энергии. Не учитывается и не исследуется должным образом изменение во времени геомеханических характеристик горных пород

основания, их собственных напряжений, региональных сейсмоструктурных условий скоростей сейсмических волн в приводохранилищных районах. Метрологический потенциал измерительных систем плотин не используется должным образом в целях прогноза землетрясений и опасных геодинамических процессов, влияния промышленных взрывов, изучения возможности возникновения гидротермальных очагов землетрясений.

Можно утверждать, конечно, что все эти геодинамические воздействия учитываются общим коэффициентом запаса в расчетах на устойчивость плотин в каждом отдельном случае, но принятая концепция расчета по предельным состояниям с разделенными коэффициентами запаса таких воздействий не предусматривает. Коэффициент запаса по нагрузке γ_f вряд ли может компенсировать эти недостатки. Объясняется это неопределенностью, неизученностью геодинамических нагрузок, которые тем не менее существуют и влияют на долговечность (старение) и надежность плотин.

Учет геодинамического воздействия может решающим образом влиять на выбор типа плотины. До настоящего времени считаются наиболее надежными бетонные плотины, но это утверждение следует рассматривать с обязательным учетом фактора времени. История гидротехники знает грунтовые плотины тысячелетнего возраста, тогда как все бетонные на порядок моложе, и многие из них подвергались уже серьезному ремонту (Кельнбрайн, Хсинфенкан, Пакойма, Саяно-Шушенская и др.), а некоторые были разрушены (Вайонт, Сен-Френсис, Мальмассе, Шиканг). Плотины из местных материалов более ремонтпригодны. Сейсмическое районирование Северной Евразии, карта ОСР-97 (вариант С), убедительно продемонстрировали имевшую место недооценку геодинамических опасностей, на осознание которой потребовалось 20 лет (ОСР-78, ОСР-97). Можно полагать, что и в XXI веке геодинамическая активность будет возрастать в ответ на рост энергии техногенного вмешательства в земную кору и глобального потепления климата. Гидротехническая наука должна быть к этому готова. Что касается вновь проектируе-

мых плотин, то здесь следует руководствоваться рекомендациями ICOLD с дополнительным учетом суровых климатических условий России.

Проблема безопасности существующих гидроузлов является более сложной. Она требует, во-первых, более точного определения качественных и количественных характеристик геодинамических воздействий. Эта задача может быть решена только путем более глубокого исследования *in situ* и мониторинга вмещающей геологической среды с помощью модернизированной, автоматизированной аппаратуры совместно с сейсмометрической аппаратурой в масштабе реального времени. После определения неучтенных нагрузок требуются поверочные расчеты и, в случае необходимости, технические решения об усилении сооружения или изменении режима эксплуатации. Изучение последствий катастрофических землетрясений последних лет свидетельствует о высокой сейсмостойкости плотин всех типов. Тем не менее службы прогноза на больших плотинах представляются нам необходимыми из соображений региональной безопасности в приводохранилищном районе и безопасности эксплуатационного персонала ГЭС, который можно своевременно вывести, не прекращая эксплуатацию электростанции. Эта новая и важная социальная роль больших плотин в сейсмичных районах могла бы значительно уменьшить число жертв и возможные ущербы от ожидаемого землетрясения, снизить энергию протестного движения экологов против строительства гидроэлектростанций и плотин. Нам представляется, что ни чисто сейсмологические, ни расчетные методы прогноза землетрясений не смогут сравниться по эффективности с непрерывными наблюдениями на больших плотинах — крупных комплексных геофизических полигонах, оснащенных цифровыми автоматизированными измерительными системами с контролем в режиме реального времени всего комплекса предвестниковых сигналов. Здесь уместно вспомнить мудрое высказывание К. Моги: «Если не рассчитывать на исключительное везение, то очень трудно осуществить предсказание землетрясения на основе одних только сейсмических данных, но в сочетании с материалами

других измерений эти данные становятся мощным, а иногда и решающим фактором в таких предсказаниях».

Ни одна из отечественных плотин еще не испытала максимального расчетного землетрясения. На Токтогульской ГЭС, перенесшей в 1992 г. сотрясение интенсивностью 7,3 балла, создается современная система раннего предупреждения сейсмической опасности. Идея создания такой системы с участием авторов состоит в организации мониторинга, построенного на иерархии чувствительности и надежности комплекса предвестников. На основании накопленного опыта натуральных наблюдений эту иерархию возглавляют гидрогеодинамические предвестники: дебит дрена у тектонических трещин, температуры и химический состав дренажных вод, фильтрационный расход в мерных водосливах и лотках, пьезометрические уровни в наиболее чувствительных пьезометрах – всего 5 предвестниковых ГГД-параметров. На втором месте находятся автоматизированные прямые и обратные отвесы в берегах или в береговых секциях плотины. На третьем месте – длиннобазовые деформометры в береговых примыканиях, в береговых штольнях, на контактах «скала–бетон». На четвертом месте – щелемеры на контактах с основанием и в межсекционных швах береговых секций плотины. На пятом – закладные струнные телетензометры в бетоне плотины. Понятно, что эта классификация условна, поскольку при сильных толчках с $M = 4$ и более разные датчики могут сработать одновременно.

Параллельно с автоматизированным контролем всех перечисленных средств измерения должны фиксироваться внешние условия: движения по ближайшим разломам, уровень водохранилища, электрическая нагрузка на ГЭС, температура воздуха, атмосферное давление и сейсмологические условия региона. При всей инструментальной вооруженности не следует забывать о визуальном методе обследования сооружения, с помощью которого по данным ICOLD обнаруживается 68 % инцидентов.

По мере накопления опыта и статистического материала точность прогноза будет возрастать.

Определение терминов

В своей практической работе авторы убедились в том, что эксплуатационный персонал гидроэлектростанций, даже расположенных в сейсмичных районах, слабо знаком с терминологией и определениями геодинамики, сеймотектоники, сейсмологии, геомеханики и геохимии, необходимыми для понимания рассматриваемой проблемы. В учебниках по гидротехнике многих определений нет, поэтому представляется целесообразным кратко напомнить наиболее часто употребляемые термины наук о твердой Земле, связанных с плотинами.

Геодинамическое (или сеймотектоническое) влияние обозначает наличие напряжений и деформаций в сооружении, вызванных быстрыми или медленными движениями вмещающей геологической среды.

Геологическая среда — часть приповерхностной земной коры, состоящая из любых горных пород, подверженная воздействию человека и преобразованная из природного состояния во вмещающую сооружение инженерно-геологическую среду. Геологическая среда дискретна — это система блоков различных размеров и физических характеристик. Блоки образуют иерархию, разделенную трещинами, разрывами и разломами разных порядков.

Трещины — это две сомкнутые поверхности, вдоль которых не развиты раздробленные породы.

Разрывы — это тектонические нарушения с зонами дробления и повышенной трещиноватости.

Глубинные разломы являются границами между крупными блоками земной коры с зонами смятия, поясами сгущения складчатых структур.

Быстрые движения или *землетрясения* есть результат разрушения горных пород под действием накопленной энергии упругих деформаций, выделенной при достижении предела прочности и устойчивости пород в очаговой области.

Очаг (гипоцентр) землетрясения понимается как разрыв или трещина с мгновенным смещением краев. При этом смещение возможно по новому разрывному нарушению и по древнему разлому, обновленному после залечивания. Его проекция на поверхность земли называется *эпицентром*.

Балл (буквенное обозначение – *I*) – единица измерения интенсивности землетрясения. В России используется 12-балльная шкала С. В. Медведева МСК-64 (Медведев, Шпонхойер, Карник). Человек, лежащий в спокойной обстановке в зоне эпицентра, способен почувствовать землетрясение интенсивностью в 2–3 балла.

Энергетический класс (*K*) – энергетическая характеристика землетрясения – определяется как логарифм энергии сейсмических волн на расстоянии 10 км от очага:

$$K = \lg E, \text{ Дж}$$

Магнитуда (*M*) – безразмерная величина, пропорциональная энергии землетрясения, определяемая по записям сейсмографов. Используется как инструментальный энергетический параметр землетрясения. Слабейшие ощущаемые толчки в зоне эпицентра имеют магнитуду $M = 1,5$, максимальная магнитуда катастрофических землетрясений – $M = 8,75$.

Сейсмическая активность – средняя частота повторения землетрясений определенного энергетического класса или магнитуды в единице объема горных пород на единице площади очаговой области. Обычно оценивается повторяемостью землетрясений энергетического класса $K = 10$.

Форшок – сотрясение перед сейсмическим толчком большой энергии с очагом, близким к гипоцентру предваряемого сильного землетрясения.

Афтершок – сотрясение после главного толчка. Обычно наблюдается с противоположной по отношению к форшоку стороны от эпицентра главного землетрясения. Отличается большим количеством сотрясений на увеличивающихся расстояниях с убывающей энергией.

Рой землетрясений – серия сейсмических толчков примерно равной энергии с малыми интервалами по времени.

Предвестник – сигнал, аномалия, предваряющие образование разрыва – сброса напряжений в геологической среде во время землетрясения. Насчитывается около 200 типов предвестников: деформационные, гидрогеодинамические, геохимические, температурные, сейсмические, электромагнитные, биологические и другие. Время появления, величина и надежность предвестников зависят от степени неоднородности и напряженности геологической среды, энергии ожидаемого землетрясения и расстояния до очага.

Сейсмодислокация – разного вида остаточные деформации земной коры после сильных землетрясений. *Палеосейсмодислокация* – следы катастрофических древних землетрясений.

Возбужденная сейсмичность – разрядка сейсмической энергии, вызванная техногенными причинами, например изменением уровня водохранилища, работой водосбросов, откачкой нефти или закачкой воды в скважины, промышленными взрывами и т. п.

Крип – медленное движение земной коры, вызванное разрядкой собственных напряжений в массиве горных пород, протекающей в течение длительного времени.

Сейсмологические условия – комплекс условий, определяющих сейсмическую активность региона, связей сильных и слабых землетрясений с тектоникой, геоструктурой, техногенными влияниями, гидродинамическим режимом, скоростью распространения сейсмических волн, появлением предвестников. Сейсмологические условия изучаются опытно-методическими сейсмическими партиями (ОМСП) Геофизической службы РАН в соответствующих регионах с анализом и обобщением в ОИФЗ РАН.

Разрушительная сила землетрясения зависит от магнитуды и расстояния от сооружения до очаговой зоны. Эта зависимость выражается уравнением макросейсмического поля:

$$I = bM - v \lg R + C,$$

где I – интенсивность (балльность) землетрясения, M – магнитуда, R – гипоцентрального расстояние. Средние значения коэффициентов:

$$b = 1,5, v = 3,5, C \approx 3,0,$$

Приближенные размеры радиусов очаговых зон землетрясений различных магнитуд:

M	5	6	7	7,5	8
R, км	10	20	50	70	100.

Площадь, очерченная этими радиусами, называется плейсто-сейсовой областью.

Предвестники сильных землетрясений, по данным различных исследователей и нашим наблюдениям, могут иметь радиусы появления до 300–600 км от эпицентра.

Краткие сведения о производстве инструментальных наблюдений на сейсмических станциях

Сейсмостанции России оборудованы приборами, образующими сейсмометрические каналы (сейсмографы) с гальванометрической, механической, тепловой, оптической и магнитной регистрацией. Независимо от способа регистрации каждый канал характеризуется тремя параметрами:

- частотным диапазоном;
- отношением максимальной и минимальной амплитуд;
- чувствительностью или увеличением измеряемых колебаний.

По международному стандарту каналы обозначаются индексами А, В и С.

Каналы А – короткопериодные, высокочувствительные с увеличением 10^4 – 10^5 и частотным диапазоном 0,2–1,5 с, в этом режиме работают в основном сейсмометры конструкции Д. П. Кирноса типа СКМ-3.

Каналы В – длиннопериодные с увеличением 700–900, в полосе 15–60 с, из сейсмометров СКД.

Каналы С – среднепериодные с увеличением 1000, с частотным диапазоном 0,2–20 с.

Поскольку спектр сейсмических колебаний очень широк, существуют каналы пониженной чувствительности КПЧ для регистрации сильных движений (землетрясения $M = 7$) с помощью горизонтальных сейсмографов (МР-2с или СМТР увеличением 3^{10} , велосиграфов и акселерографов в ждущем режиме). Кроме того, на станциях работают сейсмоскопы СБМ, ЛИС-2, фиксирующие максимальные смещения в одном или двух направлениях.

Для анализа параметров сильных землетрясений по всем сейсмостанциям мира используется гринвичское время по кварцевым часам высокой точности и морскому хронометру МХ-6.

Для режима сильного землетрясения ($M = 5$ для европейской части РФ, $M = 6$ для Восточной Сибири, $M = 7$ для Курил и Камчатки) устанавливается порядок обязательных операций на сейсмостанциях – проверка исправности приборов сильных движений и ввод их в работу (до 5 минут), проявление сейсмограмм с основных комплектов аппаратуры (до 15 минут), срочная обработка всех сейсмограмм с предварительной оценкой балльности, срочное донесение по инстанциям, предварительное определение координат эпицентра и выполнение макросейсмического обследования в районе станции.

Все сейсмограммы нумеруются, расшифровываются, штампуются и сохраняются. На сейсмограммах определяются момент вступления объемных сейсмических волн, знаки вступлений продольных и поперечных волн P и S по всем трем составляющим; амплитуды и периоды сейсмических волн.

Скорость распространения сейсмических волн зависит от плотности и упругих свойств горных пород. Средние значения скорости продольных волн V_p («сжатие–разрежение») около 8 см/с, а поперечных $V_s = 4,5$ см/с. Поперечные волны не проходят через водную преграду. Отношение этих скоростей примерно постоянно: $V_p/V_s = 1,73$. Для мелкофокусных землетрясений оно равно 1,67, для глубокофокусных (300–700 км) – 1,78. Различают третью группу волн – поверхностных, которые имеют два вида – волны Лява (поперечные) и волны Релея меньшей скорости – вертикальные эллипсоидные колебания.

Эпицентральное расстояние определяется по разности времен прихода поперечной (S) и продольной (P) волн, глубина очага – по разности прихода волн, отраженных вблизи эпицентра.

По максимальной амплитуде определяется смещение почвы. Азимут на эпицентр (угол между направлением от станции на север и направлением от станции на эпицентр отсчитывается по часовой стрелке. Искомый угол α рассчитывается по соотношению амплитуд продольных волн $\operatorname{tg} \alpha = A_{ew}/A_{ns}$ и знакам вступлений, где A_{ew} – амплитуда восток–запад, A_{ns} – амплитуда север–юг.

Координаты эпицентра вычисляются в опытно-методической сейсмической партии по известному эпицентральному расстоянию и азимуту нескольких сейсмических станций в данном регионе.

Магнитуда – относительная энергетическая характеристика землетрясения – представляет собой логарифм максимальной скорости колебаний земной поверхности или логарифм максимальных смещений в сейсмических волнах разного типа и рассчитывается по формуле

$$M = \lg(A/T)_{\max} + G,$$

где A – максимальная амплитуда, T – период смещения почвы в микронах, G – калибровочная функция, выражающая изменение соотношения A/T в зависимости от эпицентрального расстояния и глубины очага.

В практике сейсмостанций магнитуда M обычно определяется по номограммам для различных районов и типов волн.

Интенсивность в эпицентре землетрясения I_0 зависит от магнитуды M и глубины очага:

$$I_0 = 1,5M - 3,5\lg h + 3,0.$$

Для различных районов коэффициенты в этой формуле варьируют.

Энергетический класс слабых и близких землетрясений определяется по номограммам для различных районов по амплитудам и эпицентральному расстоянием ($S - P$).

Сейсмометрическая служба гидроэлектростанции должна иметь оперативную связь с ближайшей сейсмостанцией ФССН и региональной опытно-методической сейсмической партией для оперативного обмена информацией.

Приложение 3

**Численные значения балльности землетрясений
по шкале MSK в зависимости от энергии, эпицентральных
расстояний и глубины очага
(по данным Южно-Сахалинской ОМСП)**

Энергия землетрясения		Эпицентральные расстояния, км					
К	М	0	20	40	100	150	200
Глубина очага $h = 5$ км							
10	3,3	5,5	3,4	2,4	1,0	<1	<1
11	3,9	6,4	4,2	3,2	1,8	1,2	1
12	4,4	7,2	5,1	4,0	2,7	2,0	1,6
13	5,0	8,0	5,9	4,9	3,5	2,9	2,4
14	5,6	8,9	6,7	5,7	4,3	3,7	3,3
15	6,1	9,7	7,6	6,5	5,2	4,5	4,1
Глубина очага $h = 15$ м							
10	3,3	3,9	3,1	2,3	1,0	<1	<1
11	3,9	4,7	3,9	3,1	1,8	1,2	<1
12	4,4	5,5	4,8	4,0	2,6	2,0	1,6
13	5,0	6,4	5,6	4,8	3,5	2,9	2,4
14	5,6	7,2	6,4	5,6	4,3	3,7	3,3
15	6,1	8,0	7,3	6,4	5,1	4,5	4,1
Глубина очага $h = 30$ км							
10	3,3	2,8	2,5	2,0	<1	<1	<1
11	3,9	3,7	3,4	2,9	1,8	1,2	<1
12	4,4	4,5	4,2	3,7	2,6	2,0	1,6
13	5,0	5,3	5,0	4,6	3,5	2,9	2,4
14	5,6	6,2	5,9	5,4	4,3	3,7	3,3
15	6,1	7,0	6,7	6,2	5,1	4,5	4,1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Александровская Э. К. Состояние Саяно-Шушенской плотины во время четырехкратного подъема УВБ до отметки НПУ / Э. К. Александровская // Гидротехн. стр-во. – 1994. – № 10. – С. 42–46.

Антонов С. С. Напряженно-деформированное состояние плотины Саяно-Шушенской ГЭС с учетом последовательности ее возведения и омоноличивания при поэтапном наполнении водохранилища / С. С. Антонов [и др.] // Решение проблем Саяно-Шушенского гидроэнергокомплекса. – Л.: Энергоатомиздат. – 1987. – С. 91–102, С. 583.

Артюшков Е. В. Физическая тектоника / Е. В. Артюшков. – М.: ИФЗ РАН; Наука, 1993. – 438 с.

Асманов О. А. Сейсмическая опасность территории центрального Дагестана / О. А. Асманов, М. Г. Даниялов, Р. А. Левкович. – М.: Лица, 2003. – 134 с.

Барышников В. Д. Некоторые особенности развития деформационных процессов при эксплуатации гидротехнических сооружений Саяно-Шушенской ГЭС / В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова // Гидротехн. стр-во. – 1999. – № 3. – С. 38–42.

Буне В. И. Методы детального изучения сейсмичности / В. И. Буне [и др.] // Тр. ИФЗ РАН. – 1960. – № 9 (176). – 327 с.

Варга А. А. Системное моделирование взаимодействия гидротехнических сооружений и скальных массивов / А. А. Варга, М. Б. Ременяк // Гидротехн. стр-во. – 2006. – № 3. – С. 8–12.

Воронина Н. Г. Современные вертикальные движения земной коры. Средняя Сибирь / Н. Г. Воронина, Г. Ф. Уфимцев // Процессы формирования рельефа Сибири. – Новосибирск: Наука. – 1987.

Галаганов О. Н. Использование спутниковых технологий для решения геодинимических и геоэкологических задач / О. Н. Галаганов [и др.] // Наука и технология в России, НТР. – 2003. – № 4–5 (62–63). – С. 12–16.

Гидрогеохимические предвестники землетрясений // ГЕОХИ им. В. И. Вернадского АН СССР. – М.: Наука. – 1985. – 285 с.

Гамзатов Е. Г. Инновационная сейсмологическая система мониторинга плотин ГЭС в Дагестане / Е. Г. Гамзатов [и др.] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2014. – № 3. – С. 50–53.

Годзиковская А. А. Местные взрывы и землетрясения / А. А. Годзиковская. – М.: Гидропроект, 1995. – 98 с.

Гупта Х. Плотины и землетрясения / Х. Гупта, Б. Растоги. – М.: Мир, 1979. – 246 с.

Даниялов М. Г. Сейсмический мониторинг территории Дагестана (1998–2002 гг.) / М. Г. Даниялов [и др.]. – М.: Лика, 2003. – 178 с.

Дергачев А. А. Каталог сейсмических событий в районе Саяно-Шушенской ГЭС за 1990–1995 гг. / А. А. Дергачев, А. Г. Филина. – Новосибирск, 1977. – 50 с.

Джанузаков К. Д. Сусамырское землетрясение 19 августа 1992 г. / К. Д. Джанузаков [и др.] // Землетрясения Северной Евразии в 1992 г. – М.: ОИФЗ РАН. – 1997.

Джигаури Г. М. Ингульская плотина на р. Ингури / Г. М. Джигаури [и др.] // Геология и плотины. – Т. VIII. – М.: Энергия. – 1980. – С. 7–45.

Зятькова Л. К. Новейшая тектоника Западного Саяна / Л. К. Зятькова. – Новосибирск: Наука, 1973.

Зятькова Л. К. Структурная геоморфология Алтае-Саянской горной области / Л. К. Зятькова. – Новосибирск: Наука, 1977. – 214 с.

Иванов М. В. Наблюдения за плановыми смещениями плотины Саяно-Шушенской ГЭС / М. В. Иванов // Методы и средства инженерно-геодезических работ в строительстве. – М.: МИИГАиК. – 1985.

Каган М. Л. Токтогульская плотина на р. Нарын / М. Л. Каган, В. З. Чечот // Геология и плотины. – Т. VIII. – М.: Энергия. – 1980. – С. 35–40.

Калустьян Э. С. Надежность скальных оснований бетонных плотин / Э. С. Калустьян // Гидротехн. стр-во. – 1983. – № 6. – С. 7–8.

Кардинальные вопросы сейсмостойкого строительства: метод. рекомендации. – Госстрой Каз. ССР, 1980.

Карлсон А. А. Вертикальные движения приплотинных территорий Братской и Усть-Илимской ГЭС / А. А. Карлсон, А. В. Меркулов // Гидротехн. стр-во. – 2004. – № 1. – С. 43–52.

Карлсон А. А. Деформации плотины Саяно-Шушенской ГЭС – результаты и проблемы измерений / А. А. Карлсон, В. И. Кондратьев // Гидротехн. стр-во. – 1986. – № 6. – С. 36–39.

Карлсон А. А. Измерение деформаций гидротехнических сооружений / А. А. Карлсон. – М.: Недра, 1984. – 245 с.

Карлсон А. А. Натурные наблюдения геодезическими методами на Саяно-Шушенской ГЭС / А. А. Карлсон, В. И. Кондратьев // Гидротехн. стр-во. – 1986. – № 6. – С. 14–18.

Киссин И. Г. Землетрясения и подземные воды / И. Г. Киссин. – М.: Наука, 1982. – 175 с.

Колосов М. А. Фильтрационный режим поворотного устройства Красноярского судоподъемника / М. А. Колосов // Гидротехн. стр-во. – 1995. – № 1.

Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений / под ред. А. И. Савича, Б. Д. Куюнджича. – М.: Недра, 1990. – 463 с.

Кондратьев О. К. Принципиальные возможности способов прогноза землетрясений методами разведочной геофизики / О. К. Кондратьев // Наука и технологии в России (НТР). – 1999. – № 4–5 (62–63). – С. 1–8.

Корчагин Ф. Г. Влияние Зейского водохранилища на геодинамику района / Ф. Г. Корчагин // Тихоокеан. геология. – 1983. – № 5. – С. 73–79.

Корчагин Ф. Г. Геодинамика района Зейского водохранилища / Ф. Г. Корчагин [и др.] // Тихоокеан. геология. – 1985. – № 6. – С. 86–95.

Корчагин Ф. Г. Исследование короткопериодных горизонтальных блоковых движений в районе Зейского водохранилища

водохранилища / Ф. Г. Корчагин // Прогноз землетрясений. – Душанбе ; М.: Дониш – 1989. – № 11.

Корчагин Ф. Г. Район строительства Зейской ГЭС как арена возможных техногенных тектонических процессов водохранилища / Ф. Г. Корчагин // Вопросы общей и теоретической тектоники. – Хабаровск: ДВНЦ АН СССР. – 1974. – С. 146–167.

Крамынин П. И. Сейсмотектонические и геодинамические особенности района Чиркейского гидроузла / П. И. Крамынин [и др.] // Гидротехн. стр-во.– 2004. – № 9. – С. 67–72.

Крестников В. Н. Методика оценки сейсмической опасности гидротехнических сооружений / В. Н. Крестников, И. Л. Нерсисов. – М.: Наука, 1980.

Кутепов В. М. Опыт определения напряженного состояния в массиве метаморфических пород створа Саяно-Шушенской ГЭС / В. М. Кутепов // Гидротехн. стр-во.– 1965.– № 1. – С. 4–6.

Лазарев А. А. Воткинская ГЭС на р. Каме / А. А. Лазарев // Геология и плотины. – Т. VII. – М.: Энергия. – 1974. – С. 13.

Левкович Р. А. К оценке влияния Чиркейского водохранилища на изменение нормативной сейсмичности / Р. А. Левкович // Сейсмичность и сейсмоструктура восточного предкавказья. – Махачкала: ДАГ ФАН. – 1985. – 518 с.

Лешиков Ф. Н. Техногенные процессы и охрана геологической среды на юге Восточной Сибири / Ф. Н. Лешиков, Ю. Б. Тржцинский // Результаты геолого-геофизического изучения Восточной Сибири в 1976–1980 гг. – Иркутск: СО РАН. – 1982.

Ломбардо В. Н. Влияние основания на распределение напряжений в теле массивно-контрфорсной плотины / В. Н. Ломбардо // Гидротехн. стр-во. – 1966. – № 9. – с. 29–32.

Марчук А. Н. Влияние геодинамических процессов на безопасность высоких плотин / А. Н. Марчук, А. И. Савич // Гидротехн. стр-во. – 1992. – № 11. – С. 1–5.

Марчук А. Н. Гиперчувствительность измерительных систем Бурейской ГЭС к геодинамическим влияниям / А. Н. Марчук, Н. А. Марчук, А. В. Николаев // Геоэкология.– 2013. – № 3. – С. 1–9.

Марчук А. Н. Неотектоника и плотины (обзор документов международной комиссии по большим плотинам) / А. Н. Марчук // Гидротехн. стр-во. — 2000. — № 10. — С. 67–70.

Марчук А. Н. Несущая способность бетонных гравитационных плотин на скальных основаниях с учетом раскрытия контактного шва / А. Н. Марчук. — МГСУ. Дисс. на соискание уч. ст. к. т. н., 1994.

Марчук А. Н. Новые экспериментальные возможности в изучении геодинамики и прогнозировании землетрясений / А. Н. Марчук // Физика Земли. — РАН, Наука. — 1994. — № 12. — С. 78–85.

Марчук А. Н. О методике измерения напряжений в высоконапорных бетонных плотинах в сейсмичных районах / А. Н. Марчук // Гидротехн. стр-во. — 2006. — № 3. — С. 9–13.

Марчук А. Н. Опыт применения автоматизированных информационно-измерительных технологий при геодезическом контроле высоких плотин / А. Н. Марчук, Г. Н. Ткачева // Гидротехн. стр-во. — 1988. — № 2. — С. 41–44.

Марчук А. Н. Особенности состояния бетонной русловой плотины Братской ГЭС / А. Н. Марчук // Гидротехн. стр-во. — 1996. — № 5. — С. 37–41.

Марчук А. Н. Прогноз землетрясения на Северном Кавказе с помощью измерительных систем Чиркейской и Миатлинской ГЭС / А. Н. Марчук, Н. А. Марчук // Гидротехн. стр-во. — 2009. — № 3. — С. 47–50.

Марчук А. Н. Прогностические качества гидрогеодинамических предвестников землетрясений в дренажных сетях плотин Дагестана / А. Н. Марчук // Гидротехн. стр-во. — 2006. — № 1. — С. 24–29.

Марчук А. Н. Статическая работа бетонных плотин / А. Н. Марчук. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — С. 208.

Масарский С. И. Новейшие тектонические движения и сейсмичность Западного Саяна и Западной Тувы / С. И. Масарский, Г. И. Рейснер. — М.: Наука, 1971. — 155 с.

Методические рекомендации по исследованию деформационных предвестников землетрясений. Межведомственный совет

по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Президиуме АН СССР. – М.: ИФЗ РАН, 1988.

Мирзоев К. М. Возбужденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС / К. М. Мирзоев. – Душанбе ; М.: До-ниш, 1987. – 401 с.

Моги К. Предсказание землетрясений / К. Моги. – М.: Мир, 1988. – 382 с.

Невский М. В. Сверхдлиннопериодные волны деформаций на активных разломах и сейсмичность / М. В. Невский // Геофизика на рубеже веков. – 1999. – С. 124–139.

Николаев Н. И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы / Н. И. Николаев. – М.: Наука, 1988. – 491 с.

Новиков Н. Ф. Чиркейская плотина на р. Сулак / Н. Ф. Новиков, А. В. Румянцева // Геология и плотины. – Т. IX. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – С. 70–99.

Осика Д. Г. Флюидный режим сейсмически активных областей / Д. Г. Осика. – М.: Наука, 1981. – 203 с.

Осика Д. Г. Эмпирические и теоретические основы гидродинамического и геохимического методов, а также организации службы оперативного прогноза землетрясений / Д. Г. Осика // Сейсмичность и гидрогеохимия территории Дагестана. Труды института геологии. ДагРАН СССР. – 1978. – Вып. 17. – С. 2.

Отчет о НИР «Создание системы контроля на Саяно-Шушенской и Майнской ГЭС. Оценка состояния основных сооружений по данным натурных наблюдений» (заключительный). – Л.: ВНИИГ, 1985.

Панфилов В. С. Гидрогеотермические явления в генезисе сейсмичности / В. С. Панфилов // Физика Земли. – 1994. – № 2. – С. 79–87.

Патент № 2068185 Российская Федерация. Способ прогноза землетрясений / А. Н. Марчук [и др.]. – 1996.

Патент № 2067307 Российская Федерация. Способ регистрации современных тектонических движений / А. Н. Марчук [и др.]. – 1996.

Пирогов И. А. Тектонические структуры оснований высоких бетонных плотин / И. А. Пирогов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 135.

Прочухан Д. П. Инженерно-геологические условия возведения плотины Саянской ГЭС / Д. П. Прочухан, И. А. Пирогов, В. Н. Бадухин // Труды Гидропроекта. – 1972. – Сб. 27 (14). – С. 5–45.

Рассказов Л. Н. Гидротехнические сооружения / Л. Н. Рассказов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1996.

Ребиндер П. А. Поверхностные явления в твердых телах и процессах их деформации и разрушения / П. А. Ребиндер, Е. Д. Шуккин // Успехи физических наук. – Т. 108. – М.: Наука. – 1979. – Вып. 1. – С. 3–42.

Ризниченко Ю. В. Об изучении сейсмического режима / Ю. В. Ризниченко // Изв. АН СССР. Сер. Геофизическая. – 1958. – № 9. – С. 1057–1074.

Ружич В. В. Современные движения в зонах разломов Прибайкалья и механизмы их инициирования / В. В. Ружич [и др.] // Геология и геофизика. – Т. 40. – 1999. – № 3. – С. 360–372.

Савич А. И. Геофизический мониторинг основания арочной плотины Ингури ГЭС / А. И. Савич [и др.] // Гидротехн. стр-во. – 2005. – № 11. – С. 38–45.

Савич А. И. Изучение изменения скальных массивов в зоне влияния гидросооружений в период их эксплуатации / А. И. Савич, М. М. Ильин // Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений. – М.: Недра. – 1990. – С. 429–441.

Савич А. И. Обобщенные зависимости между статическими и динамическими показателями деформируемости скальных пород / А. И. Савич // Гидротехн. стр-во. – 1984. – № 8. – С. 50–54.

Сидорин А. Я. Анализ деформаций земной коры в связи с землетрясениями / А. Я. Сидорин // Комплексные исследования по прогнозу землетрясений. – М.: ОИФЗ РАН. – 1991. – С. 29–35.

Сидорин А. Я. Предвестники землетрясений / А. Я. Сидорин. – М.: Наука, 1992. – 192 с.

Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений, ИФЗ РАН / Г. А. Соболев – М.: Наука, 1993. – 298 с.

Солоненко В. П. Сейсмичность района Зейской ГЭС / В. П. Солоненко [и др.] // Геология и геофизика. – М.: СО РАН, 1977. – № 7. – С. 3–8.

Сулейманов А. И. Гидромагнитная съемка Чиркейского водохранилища. / А. И. Сулейманов, М. М. Алиев // Вопросы сейсмичности Восточного Предкавказья. – Махачкала: Дагестанский филиал АН СССР. – 1989. – Вып. 40. – С. 38–40.

Суханов Г. К. Изменение инженерно-геологических условий в основании плотины Братской ГЭС за 15 лет эксплуатации / Г. К. Суханов [и др.] // Гидротехн. стр-во. – 1978. – № 4. – С. 12–18.

Тихонов А. И. Геолого-гидрологические условия работы Чебоксарской ГЭС и оценка их воздействия на устойчивость гидротехнических сооружений / А. И. Тихонов [и др.] // Гидротехн. стр-во. – 2004. – № 7. – С. 27–31.

Храпков А. А. Применение вариационного метода наименьших квадратов к расчету сооружений совместно с основанием на ЭВМ / А. А. Храпков / Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – т. 74. – 1964.

Шандалов Д. Н. Арочная плотина Чиркейской ГЭС / Д. Н. Шандалов // Труды Гидропроекта. – 1973. – № 34. – С. 23–40.

Шпаковский Ф. В. Зейская плотина на р. Зее / Ф. В. Шпаковский // Геология и плотины. – Т. VIII. – М.: Энергия. – 1980. – С. 64–78.

Эйдельман С. Я. Раскрытие контактных швов и разуплотнение скального основания под первыми столбами русловой плотины Братской ГЭС / С. Я. Эйдельман // Известия ВНИИГ. – Т. 14. – 1970.

Юркевич Б. Н. Первая российская ГЭС XXI века / Б. Н. Юркевич [и др.] // Гидротехн. стр-во. – 2004. – № 1. – С. 2–8.

Balavadze B., Abashidze V. Monitoring of geodynamical processes at large dams by tiltmeters and strainmeters: example of Ingury HPS (Georgia).

Demmer W., Ludescher H. Measures Taken to Reduce Uplift and Seepage at Kolnbrein Dam CIGB, Q.58, R.81, p.1372, Lausanne. 1985.

ICOLD Bulletin 112 (1998). Neotectonics and dams, Paris.

Kondoh N., Iwanaga T. Historical behavior of Kurobe Dam foundation. 2nd International symposium on Field Measurement in geomechanics, Sakurai. 1988 Balkema, Rotterdam, p. 385–394.

Marchuk A. N. Russian research on earthquake prediction in relation to dam safety // Water Power and Dam Construction. March 1993, p. 37–39.

Mirtskulava D., Noniev I. Behavior of Inguri Dam during the first 10 years operation after the full filling of the reservoir // Proceedings of the Workshop. Luxemburg, 1998, p. 219–227.

Seismic Monitoring of Mratinje Dam, Seismological Institute Scopje, 1973.

Seismic Monitoring of Poechos Dam, Seismological Institute, Lima, Peru 1979.

Shen Shonggang et al. Earthquakes Induced by Reservoir Impounding and their Effects on Hsingfengkiang Dam, Scientia Sinica, Vol. 17, No 2, China.

Sibson R. H. Frictional constraints on thrust, wrench, and normal faults // Nature, 1974, Vol. 249, p. 542–544.

Wieland M., Fan B. The activities of the international commission on large dams (ICOLD) in the earthquake safety on large dams. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C. Canada.

*Утверждено к печати Ученым советом
и научно-техническим советом ИФЗ РАН.*

Марчук Алексей Николаевич
Марчук Наталия Алексеевна

ПЛОТИНЫ И ГЕОДИНАМИКА

ОПЫТ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Компьютерная верстка *А. А. Новиковой*
Дизайн обложки *Я. А. Ветрогоновой*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 12.05.2020. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 19,75. Тираж 100. Заказ 0271.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.