

УДК 550.34

Важнейшие результаты научной деятельности Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН в 2016–2020 гг. (сейсмические исследования)

© 2021 г. А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев

СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 16.02.2021 г.

Аннотация. Представлены важнейшие результаты сейсмических исследований, выполненных в 2016–2020 гг. в Сейсмологическом филиале ФИЦ ЕГС РАН. На Чиркейской ГЭС были детально изучены собственные колебания плотины и их сезонные изменения, разработана методика мониторинга собственных частот сооружения. На Саяно-Шушенской ГЭС были изучены процессы взаимодействия работающих гидроагрегатов с окружающими конструкциями и сооружениями и установлено, что при некоторых режимах работы оборудования происходит 10–20-кратное усиление собственных колебаний плотины, источником которых являются автоколебания (органные колебания) в водоводах. Разработан способ оценки реакции сооружений на сейсмические воздействия, основанный на методе когерентного восстановления полей стоячих волн и позволяющий рассчитать колебания объекта, возникающие от сейсмических воздействий в его основании. Продемонстрированы возможности определения собственных колебаний крупных объектов по низкочастотным сейсмологическим записям и их мониторинга на примере результатов анализа космических снимков и сейсмологических материалов при выяснении причин схода оползня на Елбашинском отвале Колыванского месторождения антрацита в Новосибирской области. Обоснована возможность использования данных речной сейморазведки для изучения строения земной коры на всю глубину, включая границу Мохоровичича, на примере данных, полученных при обработке профиля МОГТ-2D в нижнем течении р. Лена.

Ключевые слова: Чиркейская ГЭС, Саяно-Шушенская ГЭС, собственные колебания плотин, мониторинг собственных частот, сейсмические воздействия на сооружения, речная сейморазведка.

Для цитирования: Лисейкин А.В., Селезнев В.С. Важнейшие результаты научной деятельности Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН в 2016–2020 гг. (сейсмические исследования) // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 54–74. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.04>

Введение

Наибольшая часть исследований коллектива Сейсмологического филиала (СЕФ) ФИЦ ЕГС РАН в 2016–2020 гг. выполнялась в рамках проекта «Опасные процессы при техногенном воздействии на земную кору» под руководством д.г.-м.н. В.С. Селезнева. Исследования направлены на изучение длительных по времени сейсмических малоамплитудных сигналов, источником которых выступают различные крупные промышленные установки, колеблющиеся на собственных частотах здания и сооружения, промышленные шумы городов, а также сейсмические поля в недрах Земли. Новиз-

на состоит в разработке и внедрении методик и технологий, позволяющих исследовать опасные процессы, возникающие при техногенном воздействии на геологическую среду, изучать строение недр Земли, контролировать работу крупных промышленных предприятий, выполнять мониторинг технического состояния зданий и сооружений. Область применения результатов – системы сейсмического мониторинга земных недр, здания и сооружения, расположенные в сейсмически опасных районах, гидроэлектростанции, атомные электростанции и другие крупные промышленные объекты, изучение строения недр Земли. Авторами статьи выбраны и представлены некоторые из наиболее важных

результатов научной деятельности Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН, включающих исследования на Чиркейской и Саяно-Шушенской ГЭС, разработки способа оценки реакции сооружений на сейсмические воздействия, подходы определения собственных колебаний крупных объектов по низкочастотным сейсмологическим записям и их мониторинга, а также методики изучения глубинного строения земной коры по данным речной сейсморазведки.

Собственные колебания плотины Чиркейской ГЭС

Изучение собственных колебаний инженерных сооружений представляет существенный практический интерес в части контроля их технического состояния. Широко распространены способы мониторинга, основанные на слежении за изменением характеристик собственных колебаний во времени. Предполагается, что такие изменения, как появление трещин, ослабленных зон и смена напряжённо-деформированного состояния приводят к изменению параметров поля стоячих волн и, в частности, к изменению значений собственных частот и форм колебаний сооружения.

Плотина Чиркейской ГЭС (далее – ЧГЭС), являясь самой крупной арочной плотиной России, к тому же расположенной в зоне высокой сейсмической активности, представляет особый интерес. Немаловажным является и тот факт, что возраст данного сооружения достаточно большой (более 50 лет с начала строительства) и уже могут проявляться разнообразные эффекты, связанные со старением строительных материалов, изменением свойств основания плотины и др. Вместе с тем, анализ опубликованной литературы показывает, что другими авторами не проводилось детальных исследований собственных колебаний этой плотины. Лишь в работе [Савич и др., 2000] по результатам экспериментов, выполненных в 1996 г., были сделаны попытки изучить собственные колебания плотины ЧГЭС – выделен набор частот, которые предположительно могут быть собственными. При этом вопрос идентификации форм для каждой из частот остался открытым.

При исследованиях плотин гидроэлектростанций необходимо учитывать, что значения собственных частот меняются в зависимости от уровня водохранилища. Так, в работе [Кузьменко и др., 2007] показано, что частоты плотин Саяно-Шушенской, Красноярской и Зейской ГЭС на формах с 1 по 5–8 уменьшаются с возраста-

нием величины напора. Эти изменения являются сезонными и не связаны с появлением дефектов в конструкции плотин. Для Чиркейской ГЭС таких исследований раньше не проводилось.

Для изучения собственных колебаний плотины ЧГЭС использовался разработанный в Сибирском отделении ФИЦ ЕГС РАН метод когерентного восстановления полей стоячих волн, позволяющий из микросейсмических колебаний, зарегистрированных в различных точках здания или сооружения с использованием опорных точек, построить детальное поле стоячих волн и определить собственные частоты и формы колебаний объекта [Еманов и др., 2002]. Экспериментальные работы проводились совместно с сотрудниками Дагестанского филиала ФИЦ ЕГС РАН, дважды – при максимальном и минимальном уровнях наполнения водохранилища (далее – УВБ). Это позволило не только детально изучить поле стоячих волн, формирующихся в теле плотины, но и выявить особенности его сезонных изменений.

Измерение микросейсмических колебаний выполнялось при помощи автономных трёхкомпонентных сейсмостанций «Байкал-АСН» (собственная разработка ФИЦ ЕГС РАН). В качестве датчиков использовались трёхкомпонентные велосиметры, разработанные в Сейсмологическом филиале на базе сейсмоприёмников GD-10. Для выравнивания АЧХ сейсмоприёмников в области низких частот использовался метод низкочастотной деконволюции цифровой записи короткопериодного сейсмометра, который позволил регистрировать колебания начиная с 1 Гц. Регистрация проводилась сериями последовательных измерений колебаний пятью единицами аппаратуры, длительность записи каждого измерения – 10 мин, всего регистрация была выполнена в 287 различных точках, размещённых по десяти профилям на разных уровнях, проходящим или по галереям внутри плотины, или по балконам (рис. 1).

После проведения регистрации была выполнена цифровая обработка данных для пересчёта разновременных колебаний в одновременные согласно методике [Еманов и др., 2002]. Отметим, что для этого используются фильтры Винера, которые пропускают стоячие волны, являющиеся когерентными, и отфильтровывают некогерентные сигналы, к которым относятся бегущие волны-помехи.

На рис. 2 представлены схематичные изображения двух 1-х, 2-й и 4-й форм (номер формы принят равным количеству наблюдаемых пучностей вдоль профиля на уровне 315 м) собственных

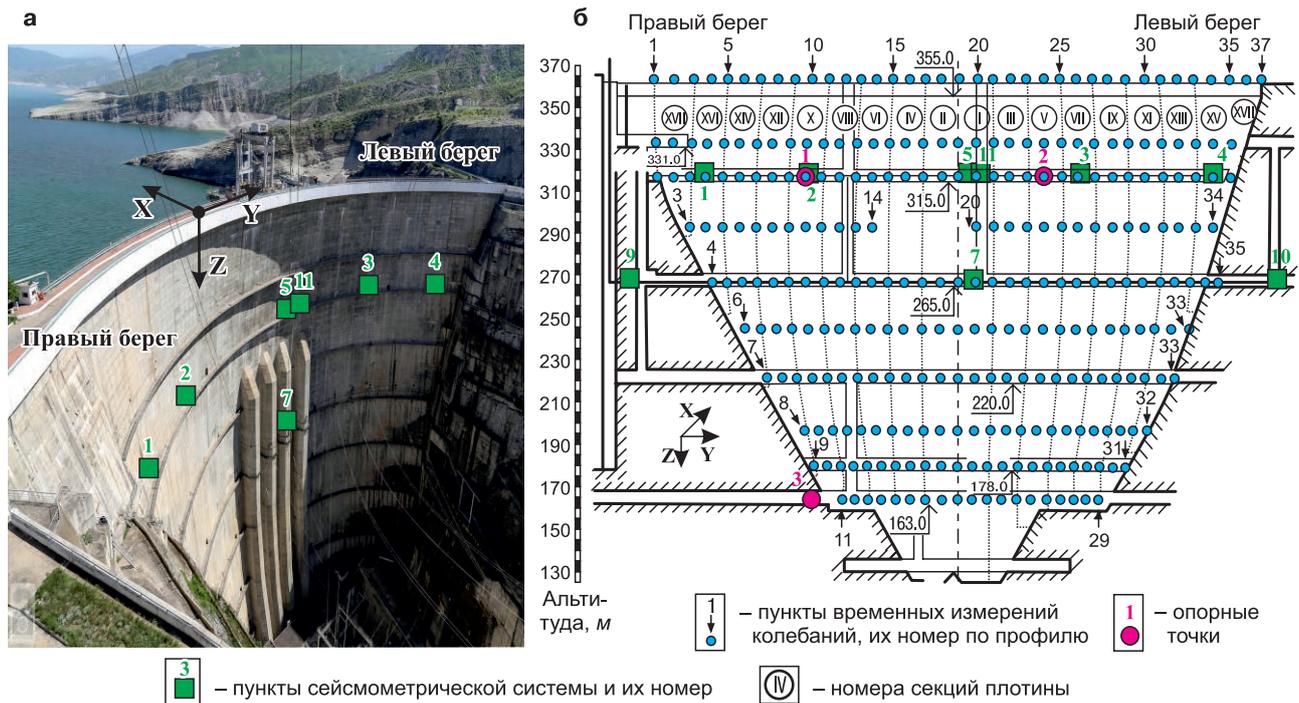


Рис. 1. Внешний вид плотины Чиркейской ГЭС (а) и реализованная схема сейсмических наблюдений (б)

поперечных колебаний плотины ЧГЭС, определённых при максимальном и минимальном УВБ. Отметим, что в обоих случаях подавляющая часть энергии колебаний сосредоточена на X-компоненте, направленной поперёк плотины. Видно, что формы колебаний практически не меняются со сменой напора, а меняются только частоты и амплитуды. Остальные колебания значительно менее выражены и не повторяются по форме при разных уровнях наполнения водохранилища. Можно сказать, поля стоячих волн на частотах, отличных от двух 1-х, 2-й и 4-й форм, абсолютно разные. Такое различие, на наш взгляд, может быть вызвано существенным изменением напряжённо-деформированного состояния плотины при изменении УВБ. В силу того, что колебания только четырёх форм повторяются с высокой степенью достоверности как при минимальном, так и при максимальном УВБ, характеристики именно этих форм можно использовать для непрерывного мониторинга технического состояния плотины ЧГЭС. Остальные колебания, безусловно, тоже несут в себе информацию о состоянии плотины. Однако, из-за существенного изменения поля стоячих волн при смене уровня водохранилища эти колебания будут наблюдаться лишь в ограниченных временных промежутках.

Был проведён анализ ежедневных изменений выделенных собственных частот плоти-

ны ЧГЭС за 2016 г., которые определялись по усреднённым спектрам микросейсмических колебаний, зарегистрированных в теле плотины существующей сейсмометрической системой. При этом частоты определялись по данным с точек наблюдений, расположенных в пучностях стоячих волн. Для двух 1-х мод это данные с точки № 5, а для 2-й – с точки № 3 (рис. 1). К сожалению, пункты наблюдения расположены таким образом, что они оказались преимущественно вблизи узлов 4-й моды. Это не позволило достоверно определять значения соответствующей собственной частоты. Возможно, после модернизации сейсмометрическая система будет дополнена пунктами наблюдения в пучности 4-й формы и это станет возможным.

Как видно из рис. 2, где представлены зависимости за годовой период (2016 г.) между УВБ и частотами 1-й и 2-й форм, существует обратная корреляционная связь – с ростом уровня воды частоты понижаются. Вместе с тем из рисунка видно, что существует эффект гистерезиса в зависимости между УВБ и частотой, т.е. при равном УВБ, но при разных режимах сработки или наполнения водохранилища, значения частот отличаются на величину до 0.05 Гц . Это связано с запаздыванием изменений частот относительно изменений УВБ. Аналогичный эффект был замечен нами при мониторинге собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС.

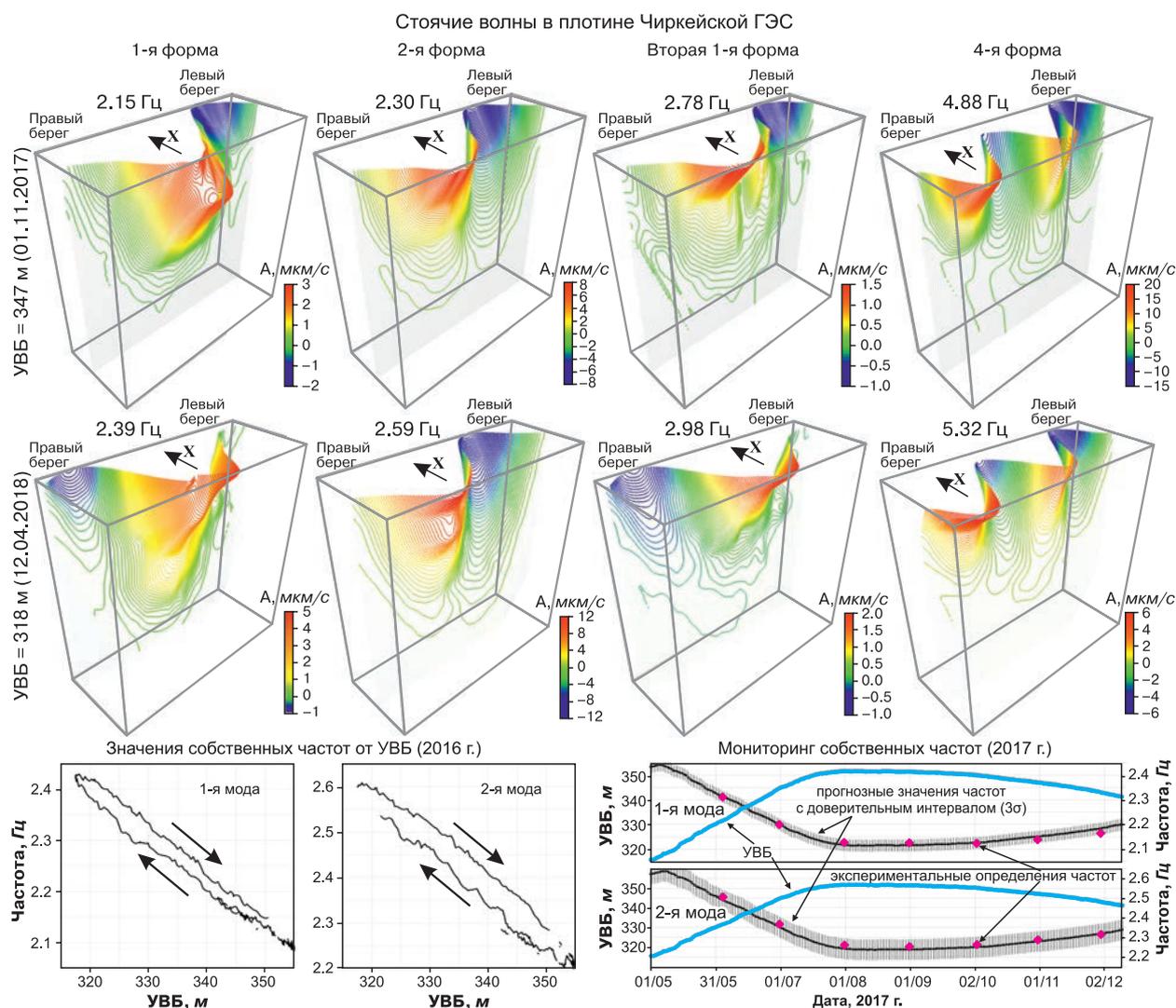


Рис. 2. К мониторингу собственных частот плотины Чиркейской ГЭС

Связан он, предположительно, с процессами релаксации тела плотины (а возможно, и всей системы плотина–основание) на изменяющееся давление воды со стороны водохранилища. Такие эффекты нужно изучать и учитывать при проведении мониторинга технического состояния плотин. В противном случае могут быть сделаны неверные выводы относительно их технического состояния.

Для разработки способа мониторинга собственных частот плотины были построены аппроксимирующие зависимости их от текущих значений УВБ в виде:

$$f(t) = aH(t - \tau) + b, \quad (1)$$

где $f(t)$ – аппроксимированное значение собственной частоты в момент времени t , a и b – коэффициенты аппроксимации линейной функцией, $H(t)$ – текущие значения УВБ,

τ – временной сдвиг, компенсирующий задержку изменений частот относительно изменений УВБ. Коэффициенты аппроксимации определялись методом наименьших квадратов по данным после учёта временного сдвига. Кроме этого, были определены значения стандартного отклонения (σ) экспериментальных данных относительно линейной регрессии. Результаты определения данных параметров приведены в таблице.

Таблица. Параметры аппроксимации зависимостей собственных частот от УВБ по данным за 2016 г.

Мода	$a, \text{Гц}/\text{м} \cdot 10^3$	$b, \text{Гц}$	$\tau, \text{сут}$	$\sigma, \text{Гц}$
1-я	-8.996	5.279	5	0.008
2-я	-10.962	6.094	7	0.014
Вторая 1-я	-7.285	5.317	11	0.014

Выполнять мониторинг собственных частот плотины предлагается следующим образом.

В первую очередь, по усреднённым спектрам сейсмических записей в точках, расположенных вблизи пучностей, определяются текущие значения частот двух первых и второй мод. С учётом данных об уровне водохранилища, по формуле (1) и с параметрами, приведёнными в таблице, вычисляются прогнозные значения собственных частот. Выполняется сравнение экспериментальных и прогнозных значений частот. В случае, если наблюдаемые частоты превышают прогнозные на величину более 3σ , по правилу «трёх сигм», делается вывод об изменении технического состояния плотины и необходимости установления причин данных изменений.

Пример реализации способа показан на рис. 2, где представлены прогнозные значения собственных частот от УВБ и данные их экспериментального определения. Из рисунка видно, что наблюдаемые значения расположены внутри доверительных интервалов. Это означает, что в 2017 г. техническое состояние плотины оставалось стабильным (таким же, как в 2016 г.).

Представленные в исследовании подходы могут быть использованы и на других арочных и бетонных плотинах ГЭС. Другие исследователи также развивают способы мониторинга собственных частот плотин с целью контроля за целостностью плотины и обнаружения дефектов. Однако, эта методика пока ещё является новой и не получила повсеместного внедрения. Основная причина, по нашему мнению, связана с большими погрешностями в определении частот и с трудностями в интерпретации их изменений, которые в большей степени зависят от изменения уровня водохранилища. Всё это приводит к низкой степени достоверности результатов исследований.

Большинство погрешностей можно исключить за счёт изучения собственных колебаний плотин по очень плотным системам наблюдений. Метод когерентного восстановления полей стоячих волн, использованный в работе, позволяет выполнить такие исследования с высокой точностью. За счёт возможности реализации наблюдений небольшим количеством регистрирующей аппаратуры, методика достаточно технологична.

Некоторые исследователи (например, [Pereira et al., 2018]) учитывали эффект от уровня воды водохранилища путём ввода корректирующей функции, зависящей только от уровня верхнего бьефа. В нашем исследовании мы установили, что на значения собственных частот влияют не только сезонные колебания уровня воды, но и дополнительные факторы, предположительно связанные с релаксационными процессами в плотине или её основании. Эти процессы приводят к тому,

что зависимости между уровнем водохранилища и частотами приобретают вид петель, подобных петлям гистерезиса. Поэтому для учёта этого эффекта в корректирующую функцию мы предлагаем ввести дополнительный параметр, описывающий задержку изменений частот относительно изменений уровня воды. Возможно, такой эффект существует и для других крупных плотин ГЭС. Однако, насколько нам известно, он ещё не был изучен другими исследователями.

Следует отметить, что изменения технического состояния, связанные, например, со старением бетона или с изменением свойств основания плотины, достаточно длительны по времени. Поэтому для выявления таких изменений могут потребоваться годы или даже десятилетия экспериментальных наблюдений.

Автоколебания в водоводах Саяно-Шушенской ГЭС

Одно из направлений, развиваемых в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, связано с изучением собственных колебаний, возникающих в водоводах гидротурбин. Для определения параметров динамических воздействий на агрегатные блоки от работы всех гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС (далее – СШГЭС), реконструированных после её аварии, в рамках договоров с ПАО «РусГидро» были проведены исследования колебаний их элементов в натуральных условиях. С этой целью возле каждого из испытуемых гидроагрегатов были установлены временные сейсмостанции и зарегистрированы колебания при различных эксплуатационных режимах в течение нескольких суток. Основной результат состоит в том, что амплитуды излучаемых новыми гидроагрегатами колебаний в окружающую среду существенно ниже, чем от старых гидроагрегатов, что свидетельствует об их улучшенном вибрационном состоянии. Но вместе с этим было установлено, что при работе всех без исключения новых гидроагрегатов существуют интервалы нагрузок, при которых на порядок увеличиваются собственные колебания плотины (рис. 3). Такого эффекта у старых машин не наблюдалось. Из рисунка видно, что при нагрузках в 120–450 МВт амплитуды вибрации относительно невелики, ниже предельно допустимого уровня, в то время как амплитуды собственных колебаний плотины увеличиваются на порядок (до 10–20 раз). Таким образом, наблюдается взаимодействие между работающим гидроагрегатом и плотинной, приводящее к резонансному усилению колебаний.

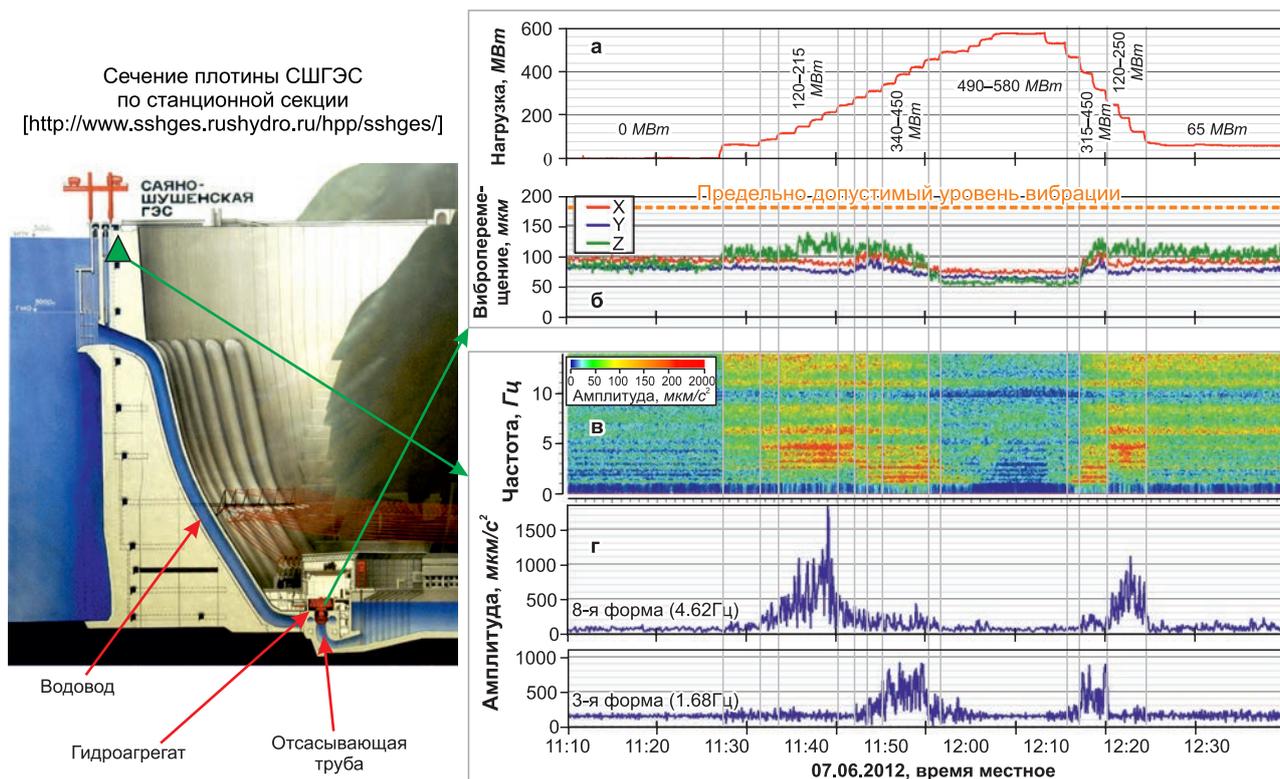


Рис. 3. Анализ взаимодействий между работающим гидроагрегатом СШГЭС и плотиной: а – изменение нагрузок гидроагрегата № 8; б – вибрации генераторного подшипника; в, г – показания сейсмического датчика в верхней части плотины: спектрограмма (в) и графики изменения амплитуд собственных колебаний плотины (г)

На гидростанциях проводится вибрационный контроль оборудования, однако взаимодействие гидроагрегатов с окружающей средой, приводящее иногда к значительным колебаниям различных конструкций ГЭС, не отслеживается. Сильные вибрации возникают при совпадении излучаемых гидроагрегатом частот с собственными частотами различных элементов конструкций и отдельных сооружений. Нашими исследованиями показано, что основной причиной многократного (резонансного) увеличения амплитуд собственных колебаний плотины СШГЭС, постоянно наблюдаемого при определённых режимах работы гидроагрегатов, являются собственные гидроакустические автоколебания, возникающие в водоводах гидротурбин при течении воды. В качестве примера на рис. 4 приводятся усреднённые амплитудные спектры колебаний в вертикальном направлении, зарегистрированных на водоводе второго гидроагрегата, в нижней его части. Каждый из спектров построен для нагрузок от 300 до 500 МВт, с шагом через 20 МВт в режиме без подачи (а) и с подачей (б) воздуха. Под обозначениями (в) и (г) дано схематическое изображение стоячих волн в трубах с одним

и двумя открытыми концами. Из рис. 4а видно, что когда второй гидроагрегат работал в режиме без подачи воздуха в водовод, в низкочастотной части спектров можно было выделить последовательность из четырёх колебаний, частоты которых не меняются со временем и составляют 1.7, 4.3, 6.7 и 8.9 Гц. В случае, когда гидроагрегат работает в режиме с подачей воздуха, частоты первых четырёх колебаний уменьшаются.

Данные колебания являются первыми четырьмя модами стоячих волн в водоводе, это подтверждается следующим. Рассмотрим представленное на рис. 4в схематическое изображение сформировавшейся стоячей волны в трубе, один конец которой закрыт, а второй – открыт. Данная модель приближённо соответствует конструкции водовода, так как с одной стороны находится водохранилище (открытый конец), а с другой расположен гидроагрегат, препятствующий распространению волн (закрытый конец). В этой модели формируются стоячие волны таким образом, что 1-я мода соответствует 1/4 длины волны, 2-я мода – 3/4 длины, и так далее. У закрытого конца трубы находятся узлы смещения частиц жидкости при колебаниях; они же

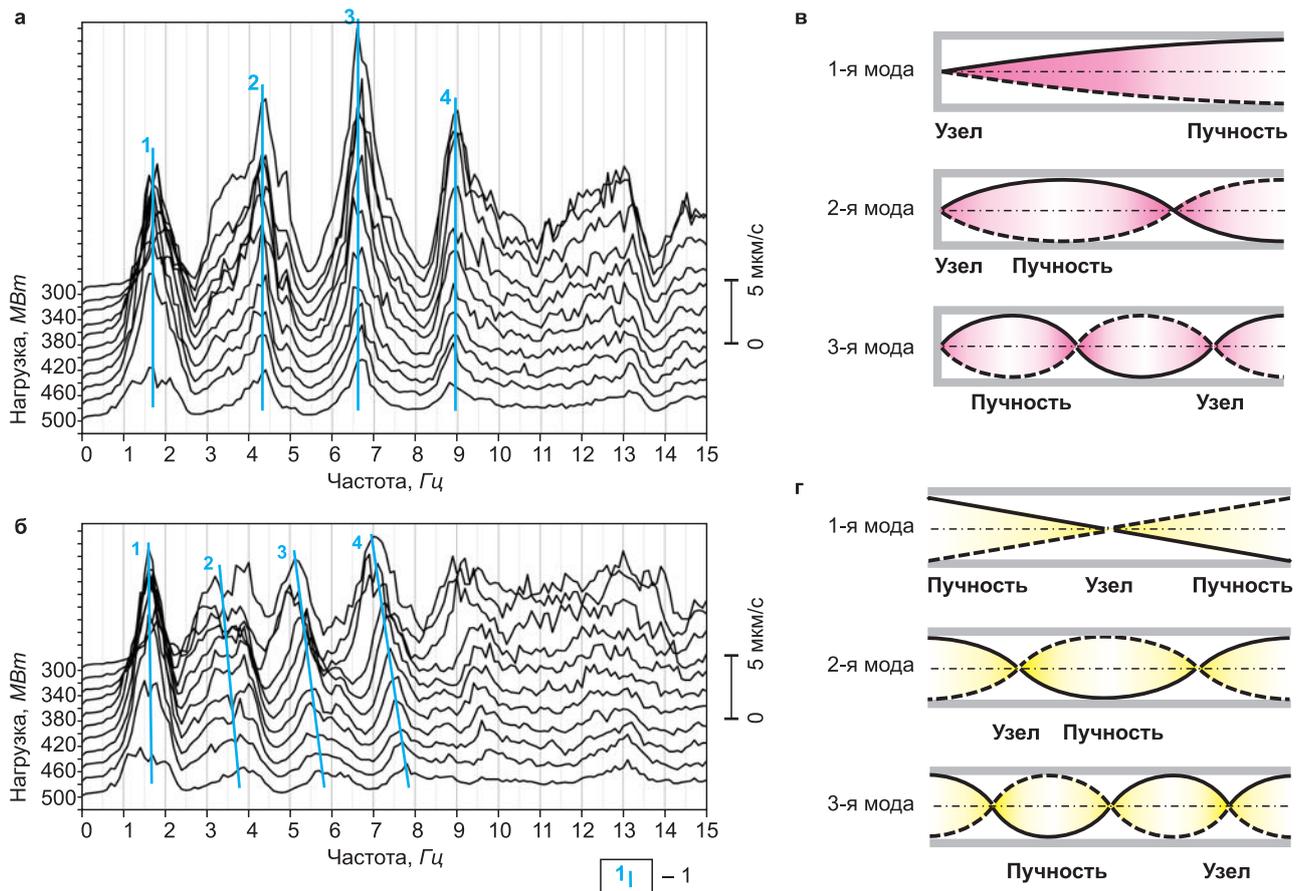


Рис. 4. Усреднённые амплитудные спектры вертикальных колебаний, зарегистрированных на водоводе 2-го гидроагрегата СШГЭС, работающего в режиме без подачи (а) и с подачей (б) воздуха в водовод; (в) и (г) — схематичное изображение стоячих волн в трубе с одним закрытым концом и полностью открытой соответственно.

1 — номер моды стоячей волны

являются пучностями давления, возникающими при отражении волн от препятствия. Зная длину водовода, равную 241 м, и частоты колебаний, определённые по спектрам на рис. 4а, можно приблизительно рассчитать скорость распространения акустических волн в водоводе. Она будет составлять, в среднем по четырём частотам, 1380 м/с. Известно, что при газонасыщении жидкости скорость распространения акустических волн уменьшается. Мы это наблюдаем по уменьшению частот, полученных со спектров в режиме, когда в водовод подаётся воздух (рис. 4б).

Мы также рассмотрели случай, когда формируются стоячие волны в открытой трубе. В этой модели формируются стоячие волны таким образом, что 1-я мода соответствует 1/2 длины волны, 2-я мода — 1 длине и так далее (рис. 4г). Как известно, при аварии 17 августа 2009 г. на СШГЭС после выброса второго гидроагрегата поток воды из водовода хлынул в машин-

ный зал и в отсасывающую трубу. То, что поток разделился на две части, должно существенно усложнить поле стоячих волн. Предположим, что основная часть потока устремилась в отсасывающую трубу. Тогда общая длина трубы, даже без учёта размеров спиральной камеры, составит не менее 278 м. Будем использовать эту величину для оценки скорости распространения акустических волн в потоке. В 4.4 км от СШГЭС расположена сейсмостанция «Черёмушки», на которой были зафиксированы колебания, происходящие на гидроэлектростанции во время и после аварии (рис. 5). Из представленного рисунка видно, что после аварии, в течение примерно 20 мин (до 08:34:55 местного времени), в волновом поле наблюдается набор из трёх колебаний с частотами 2.4, 4.7 и 7.5 Гц. Мы полагаем, что эти колебания являются собственными колебаниями открытого водовода (возможно, вместе с участком отсасывающей трубы), а их прекращение через 20 мин после аварии связано с перекрытием

водовода второго гидроагрегата персоналом ГЭС. Расчёт показывает, что скорость распространения акустических колебаний в такой модели (в среднем, по трём выделенным модам) составляет около 1342 м/с. Это значение приближённо соответствует значениям, полученным для водовода, при работе гидроагрегата без подачи дополнительного воздуха в поток, а значит, наше предположение не противоречит принятой модели.

Оценка реакции сооружений на сейсмические воздействия

Оценка сейсмостойкости инженерных сооружений, расположенных в зонах повышенной сейсмической активности, чрезвычайно важна и не требует дополнительной аргументации. Анализ опубликованной на эту тему литературы показывает, что большинство исследователей как в России, так и в других странах, оценивают сейсмостойкость по результатам матмоделирования: создаётся конечно-элементная модель здания или сооружения и производятся численные расчёты реакции этой модели на то или иное внешнее сейсмическое воздействие. Необходимо отметить, что специалистами филиалов

ФИЦ ЕГС РАН за почти 20 лет было обследовано более 100 различных сооружений, на десятках из них выполнялось матмоделирование, и ни разу математическая модель колебаний не совпала полностью с экспериментальной. Многие исследователи идут по пути уточнения математической модели с целью достижения наилучшего соответствия численных расчётов с результатами натуральных экспериментов [Егоров и др., 2016; Красников, 2007]. Как правило, удаётся достичь соответствия частот нескольких первых форм колебаний, а более высокие частоты не совпадают. Но даже если удастся подобрать частоты, то намного сложнее рассчитать параметры затухания колебаний. Идея предлагаемого способа состоит в том, чтобы разработать методику оценки реакции сооружения на воздействия не применяя матмоделирование, а используя результаты экспериментальных определений собственных колебаний сооружения.

В инженерной сейсмологии известно, что при сейсмических воздействиях происходит усиление колебаний от основания к верху сооружения преимущественно на собственных частотах, что подтверждается наблюдениями, выполненными на различных объектах. Рассмотрим это на примере

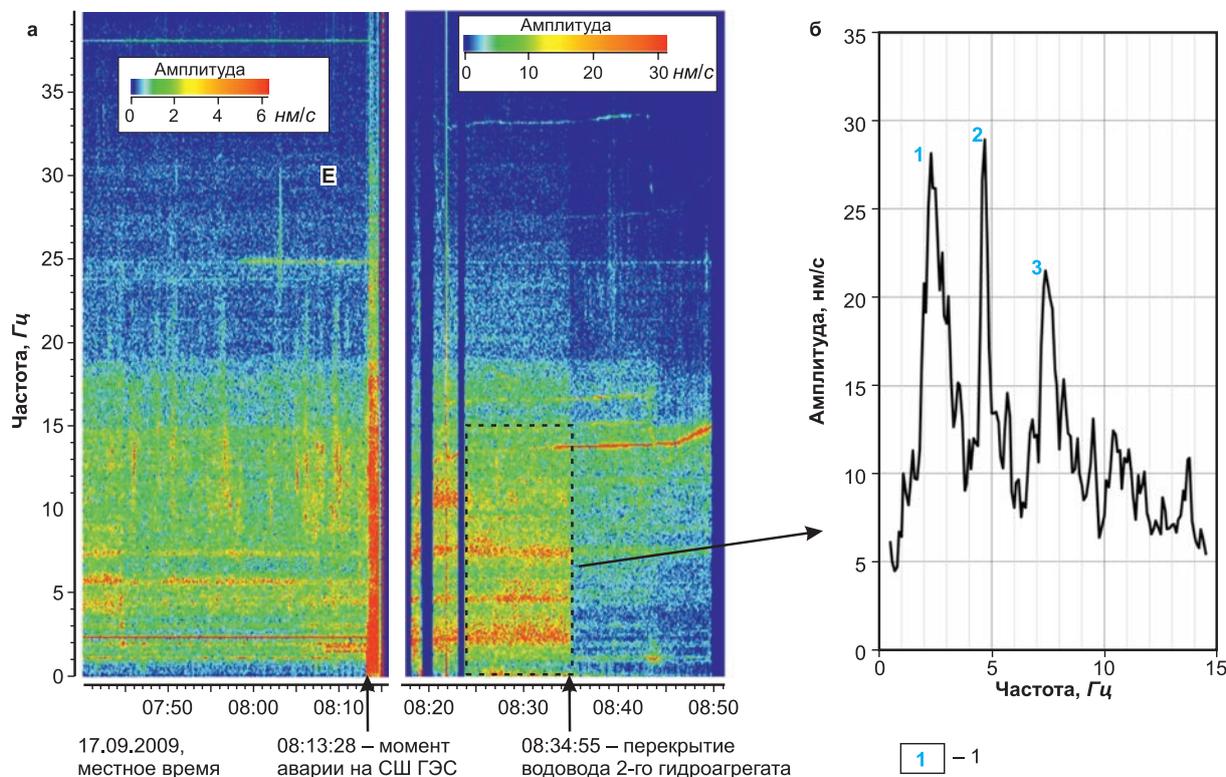


Рис. 5. Спектрограмма (а) и усреднённый спектр (б) фрагмента сейсмической записи горизонтального (Е) канала сейсмостанции «Черёмушки» во время аварии на СШГЭС.

1 – номер моды собственных колебаний водовода

плотины СШГЭС. На рис. 6 приведён пример, описывающий реакцию плотины на воздействие, вызванное Тувинским землетрясением, произошедшим 26.02.2012 г. на эпицентральной удалении около 300 км [Еманов и др., 2014]. На рис. 6а показаны колебания в поперечном к плотине направлении (X). Из записи сейсмостанции «Черёмушки», которая, как и плотина СШГЭС, расположена на скальном грунте, на удалении 4.4 км, видно, что максимальная амплитуда колебаний составляет около 2 мм/с. В то же время при регистрации в верхних точках плотины максимумы амплитуд колебаний в несколько раз выше и достигают 7–20 мм/с. Причём в разных точках плотины формы записей колебаний и их амплитуды отличаются. На рис. 6б показано сравнение спектров этих записей со спектрами стоячих волн, полученных по методике [Еманов и др., 2002] на основе регистрации микросейсмических шумов. Видно, что в верхних точках

плотины в спектрах присутствуют составляющие с частотами, совпадающими с собственными частотами плотины. Предполагая, что колебания основания плотины СШГЭС, вызванные землетрясением, мало отличаются от колебаний, зарегистрированных в 4 км от неё, можно заключить, что усиление колебаний от низа к верху плотины произошло преимущественно на собственных частотах. Разный вид колебаний и их амплитуд можно объяснить тем, что точки расположены в различных местах относительно узлов и пучностей стоячих волн, формирующихся в плотине. Исходя из этого, появилась идея использовать информацию, полученную при детальном обследовании сооружения методом стоячих волн для того, чтобы предсказать поведение сооружения при различных сейсмических воздействиях. Так можно оценить сейсмостойкость сооружения или проверить, как это делается другими методами.

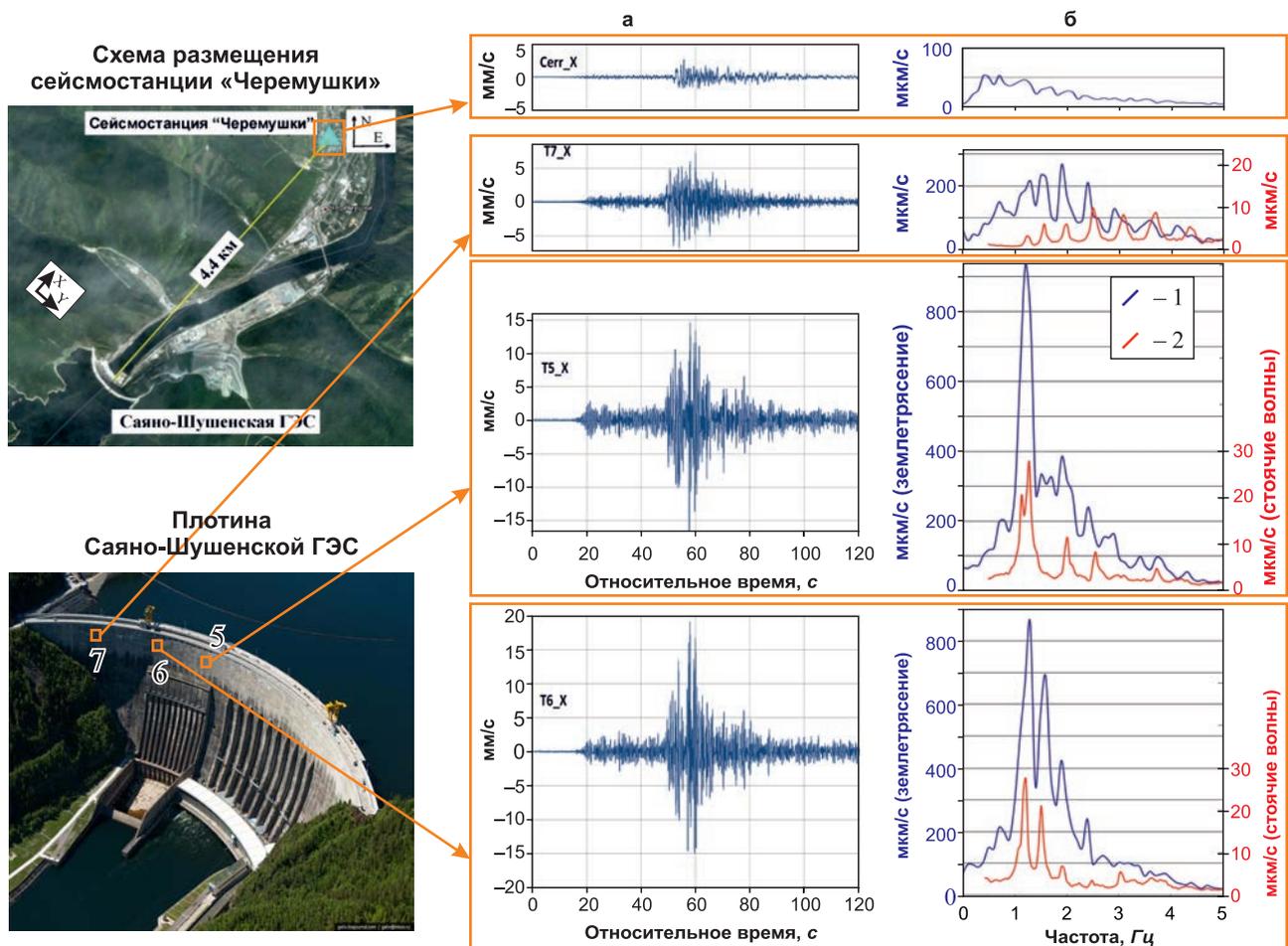


Рис. 6. Поперечные колебания различных точек плотины СШГЭС, вызванных Тувинским землетрясением (26.02.2012 г., $M=6.8$, ~300 км к юго-востоку от ГЭС):

- а – записи землетрясения; б – амплитудные спектры записей землетрясения (1) и микроколебаний стоячих волн (2) в соответствующих точках

Технология изучения стоячих волн в крупных сооружениях на основе регистрации сейсмических шумов с использованием малоканальной аппаратуры разработана в Сибирском отделении ФИЦ ЕГС РАН около 20 лет назад [Еманов и др., 2002]. Упрощённо она состоит в следующем. В первую очередь выполняются измерения по специальной схеме: на сооружении выбирается как минимум одна точка, в которой устанавливается аппаратура для постоянной регистрации колебаний, называемая опорной. Имеющимся набором из нескольких сейсмостанций проводятся последовательные серии измерений микросейсмических колебаний во всём сооружении. Количество таких серий может быть любым, поэтому имея даже небольшой набор сейсмостанций, можно измерить колебания по очень густой сетке, состоящей из N точек наблюдения. После измерений выполняется цифровая обработка данных, состоящая в том, что для каждой пары точек, включающей опорную и i -ю точки на объекте, рассчитываются фильтры Винера по приведённой ниже формуле:

$$h_i(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^n S_{ij}(\omega) S_{0j}^*(\omega)}{\sum_{j=1}^n |S_{0j}(\omega)|^2}, \quad (2)$$

где $h_i(\omega)$ – частотная характеристика фильтра Винера для пересчёта колебаний между опорной и i -й точками, $i=1, \dots, N$; $S_{ij}(\omega)$ и $S_{0j}(\omega)$ – преобразования Фурье j -х фрагментов одновременных записей в перемещаемой и опорной точках, верхний индекс * означает комплексное сопряжение; n – количество таких фрагментов. На большинстве исследуемых зданий и сооружений используются следующие параметры, установленные опытным путём: 10 с – длительность каждого фрагмента; длина всей записи 600 с; отсюда $n=60$. Фильтр (2) устроен таким образом, что пропускает когерентные колебания, какими являются стоячие волны, и подавляет колебания от бегущих волн-помех, которые не являются когерентными. После этого выполняется свёртка колебаний в опорной точке с полученными фильтрами Винера и в итоге получается единовременное и детальное поле стоячих волн на объекте.

Суть предлагаемого нами подхода состоит в следующем. Наблюдения организуются таким образом, что добавляется ещё одна опорная точка, устанавливаемая в основании здания или сооружения (рис. 7). Проводятся измерения колебаний и последующая обработка данных с расчётом фильтров Винера h_i между верхней опорной

точкой и различными точками здания. Дополнительно рассчитывается фильтр h_0 между нижней и верхней опорными точками.

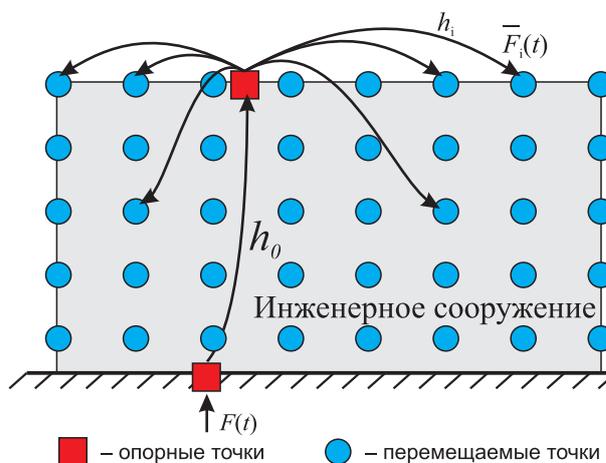


Рис. 7. Схема выполнения измерений сейсмического шума на объекте с целью дальнейшей оценки его реакции на сейсмические воздействия

Необходимо отметить, что точность расчёта фильтра h_0 будет существенно зависеть от соотношения сигнал/шум в нижней опорной точке. Так как точка стоит в основании сооружения, то амплитуда полезного сигнала, связанного с собственными колебаниями сооружения, существенно ниже амплитуд колебаний в верхних точках. Это проявляется в том, что функция когерентности сигналов с нижней и верхней опорных точек принимает пониженные значения на собственных частотах в отличие от случая, когда обе точки расположены в верхней части сооружения. Как известно из работы [Еманов и др., 2002], точность расчёта характеристик фильтров Винера зависит как от значений когерентности, так и от длительности используемой записи сигналов: чем выше когерентность, тем меньший интервал времени регистрации требуется для достижения заданной точности. Вместе с тем, само значение когерентности также определяется с некоторой погрешностью, зависящей как от соотношения сигнал/шум, так и от длительности записи. Для того, чтобы определить оптимальную длительность сигнала, в работе [Еманов и др., 2008] предложено анализировать изменения спектров функции когерентности, рассчитанных для разных по времени длительностей сигналов. Оптимальным временем считается такое, когда достигается стабилизация спектров, т.е. когда увеличение времени регистрации не приводит к изменению значений функции когерентности. Для случая с плотной СШГЭС

мы выяснили, что при длительности записей от 13 ч и более спектры становятся стабильными. Зная значения когерентности для различных частот, можно с использованием формул из работы [Еманов и др., 2002] оценить погрешность расчёта характеристик фильтров Винера. Так, по нашим расчётам, при значении когерентности около 0.2 для частот 1.2 и 1.6 Гц (2-я и 3-я формы собственных колебаний плотины) и длительности записи 13 ч относительная точность составила около 5%. Для сравнения, при регистрации колебаний в верхних точках плотины, когда когерентность выше 0.8, точность в 5% достигается при длительности регистрации менее 10 минут. Таким образом, чтобы обеспечить высокую точность построения характеристик фильтров, необходимо существенно увеличить длительность регистрации одновременно в нижней и верхней точках.

Расчёт теоретических сейсмограмм осуществляется следующим образом. Пусть $F(t)$ – некоторая функция, описывающая колебание, которое пришло в нижнюю опорную точку; фактически это колебание основания сооружения при сейсмическом воздействии. Далее производится расчёт теоретических колебаний $\bar{F}_i(t)$ в каждой из точек сооружения по формуле:

$$\bar{F}_i(t) = [F(t) * h_0(t)] * h_i(t) + F(t), \quad (3)$$

где * – это операция свёртки; $h_0(\omega)$ – фильтр Винера, рассчитанный по формуле (2) для пересчёта колебаний между нижней и верхней опорными точками, а $h_i(\omega)$ – фильтры между верхней опорной точкой и i -ми точками сооружения ($i=1, \dots, N$) соответственно. Данная процедура определяет, как преобразуется колебание из основания сооружения в любую из точек на сооружении. Дополнительное слагаемое $F(t)$ в формуле (3) введено для учёта бегущих волн, возникающих при сейсмическом воздействии и подавленных фильтрами Винера. Так как длина волны при низкочастотных сейсмических воздействиях, как правило, много больше геометрических размеров сооружения, то такое допущение представляется справедливым. На заключительном этапе, чтобы перейти к оценке сейсмостойкости сооружения, можно строить детальные карты колебаний объекта в разные моменты времени и от различных пробных сейсмических воздействий, по которым можно определять, в каких местах будут критические изгибы конструкции, когда она может разрушиться и при каких воздействиях это произойдёт.

Для проверки достоверности предложенной методики расчёта теоретических сейсмограмм проведён следующий эксперимент (рис. 8). В качестве экспериментального воздействия использовались записи Тувинского землетрясения от 26.02.2012 г., зафиксированные сейсмометрической системой в плотине Саяно-Шушенской ГЭС. К сожалению, записи этого землетрясения есть только в верхних точках плотины, а в основании – отсутствуют. Поэтому в качестве исходного сейсмического воздействия применялись записи сейсмостанции «Черёмушки», N и E компоненты которой пересчитывались в компоненты X и Y , соответствующие системе координат плотины. Необходимо отметить, что записи сейсмокомплекса в теле плотины были с неточным временем и не для всех компонент приборов они были кондиционными. Всё это не дало возможности провести полноценное сравнение теоретических и реальных записей землетрясения. Для расчёта фильтров Винера использовались записи в двух точках – в нижней части плотины и в пятом сеймопавильоне (т. 1 и т. 3 на рис. 6а соответственно). Из представленных результатов расчёта теоретических сейсмограмм видно, что усиление происходит на X -компоненте, а на Y и Z колебания практически не усиливаются. Видно, что теоретические сейсмограммы по амплитуде близки к реальными. Некоторое различие в амплитудах и формах сигналов предположительно связано с тем, что исходная запись землетрясения использовалась с сейсмостанции «Черёмушки», расположенной на расстоянии 4.4 км от СШГЭС, а не с основания плотины (где отсутствуют кондиционные записи). Кроме этого, возможное искажение вносит тот факт, что сравниваются записи, полученные разными типами сейсмической аппаратуры с отличающимися характеристиками.

Необходимо отметить, что у зданий (при неизменном техническом состоянии) параметры собственных колебаний практически постоянные. В то же время собственные колебания плотин (особенно высоконапорных ГЭС) могут меняться с течением времени. Так, по нашим наблюдениям, собственные частоты плотины СШГЭС меняются в пределах 0.1–0.2 Гц в течение года, и эти изменения в основном коррелируют с изменениями уровня водохранилища. Данное обстоятельство необходимо учитывать для более достоверной оценки сейсмостойкости подобных объектов. К сожалению, в представленном выше примере это не было учтено из-за недостаточной экспериментальной базы.

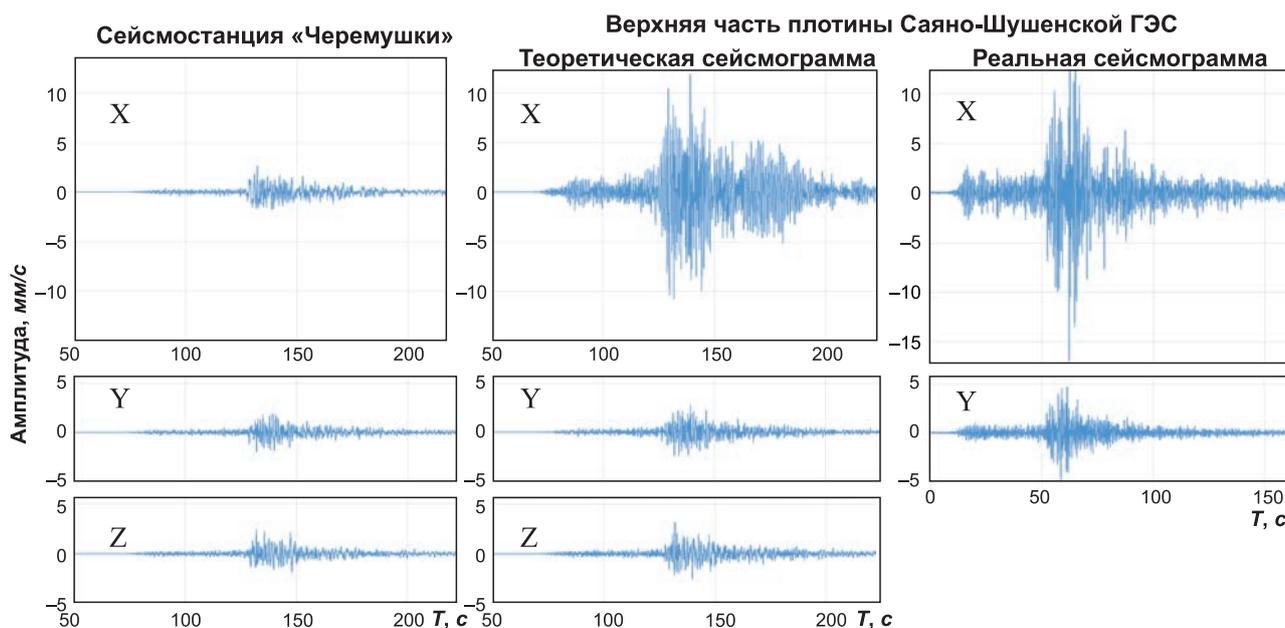


Рис. 8. Пример реализации способа для плотины Саяно-Шушенской ГЭС: а – запись сейсмостанции «Черёмушки»; б, в – соответственно теоретические и реальные сейсмограммы для т. 3 (см. схему на рис. 6)

Мониторинг колебаний крупных геологических объектов

В Сейсмологическом филиале ФИЦ ЕГС РАН разрабатывается технология отслеживания опасных техногенных процессов на месторождениях, основанная на анализе данных сейсмологических сетей. В качестве примера приведём результаты интерпретации сейсмических данных до и после оползня, произошедшего 18 июля 2020 г., примерно в 21:15 местного времени, на Колыванском месторождении антрацита Новосибирской области. Предварительно оценённый объём его составил около 10% от Елбашинского отвала (около 5 млн. м³). Деформация обошлась без жертв, тем не менее, была создана комиссия для выяснения причин инцидента.

Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН занимается изучением сейсмической обстановки в Алтае-Саянском регионе и прилегающих территориях. Попробуем, используя данные космической съёмки и записи ближайшей сейсмической станции, разобраться в причинах, которые привели к образованию оползня. На рис. 9 представлены космические снимки исследуемого района, полученные в разное время. Чтобы понять окружающую обстановку вокруг отвала, на рисунке приведены отметки высот 185, 212 и 219 м над уровнем моря. На снимке 2013 г. видно, что формирующийся отвал препятствовал естественному стоку вод и в его северо-вос-

точной части происходило обводнение. В 2017 г. из сформировавшегося в северо-восточной части отвала озера был сооружён дренажный канал на уровне в 212 м, а в 2019 г. он находился уже на уровне 219 м. К 2020 г. обводнённая часть отвала могла составлять несколько десятков метров по высоте и около квадратного километра по площади. Для того, чтобы оползень начал движение, нужен был лишь толчок. Возникает вопрос: что могло послужить спусковым крючком для начала движения?

На рис. 10 представлен фрагмент карты месторождений горючих полезных ископаемых Новосибирской области. Колыванское месторождение, на котором произошёл оползень, расположено в северной части Горловской впадины. В 9 км на юго-юго-запад от Елбашинского отвала установлена широкополосная сейсмическая станция «Харино». При анализе записей, полученных за период, охватывающий время схода оползня, не было выявлено каких-либо значимых сейсмических воздействий, которые могли бы быть достоверной причиной деформации. Вместе с тем, в сейсмическом шуме станции «Харино» обнаружены малоамплитудные сигналы, которые с высокой вероятностью могут быть связаны с колебаниями Елбашинского отвала, и интерпретация которых позволяет объяснить процессы, происходящие до и после схода оползня.

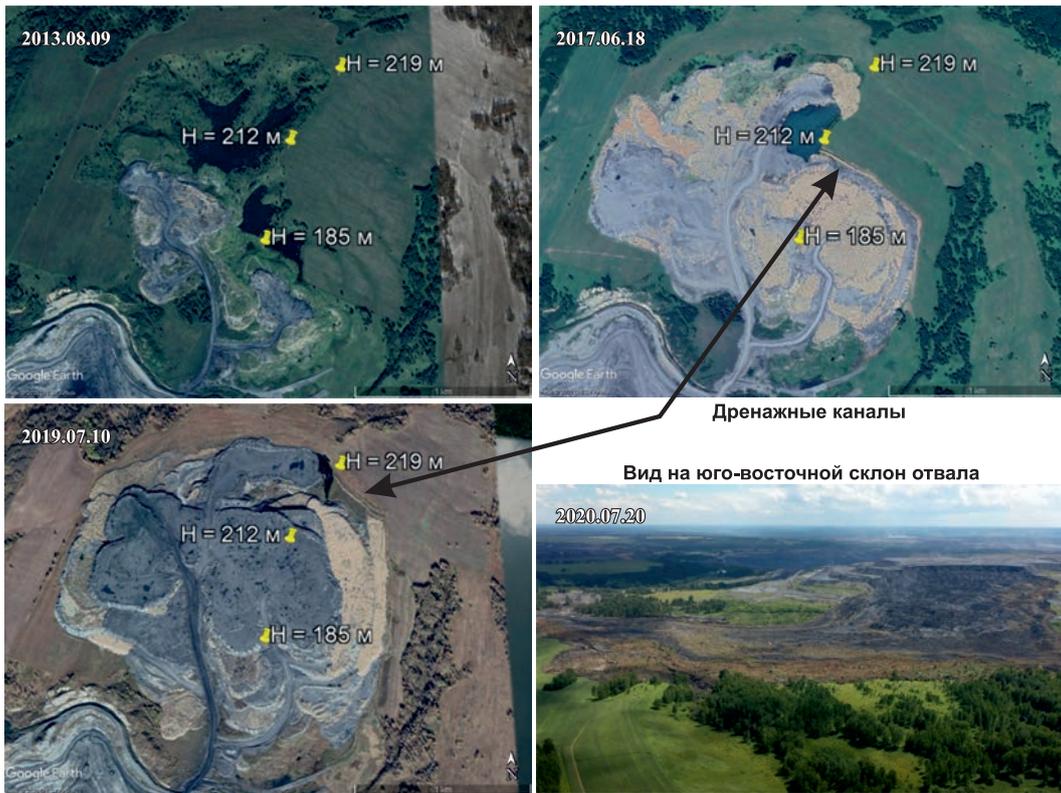


Рис. 9. Космические снимки Елбашинского отвала Колыванского месторождения (Новосибирская область) и фотография оползня

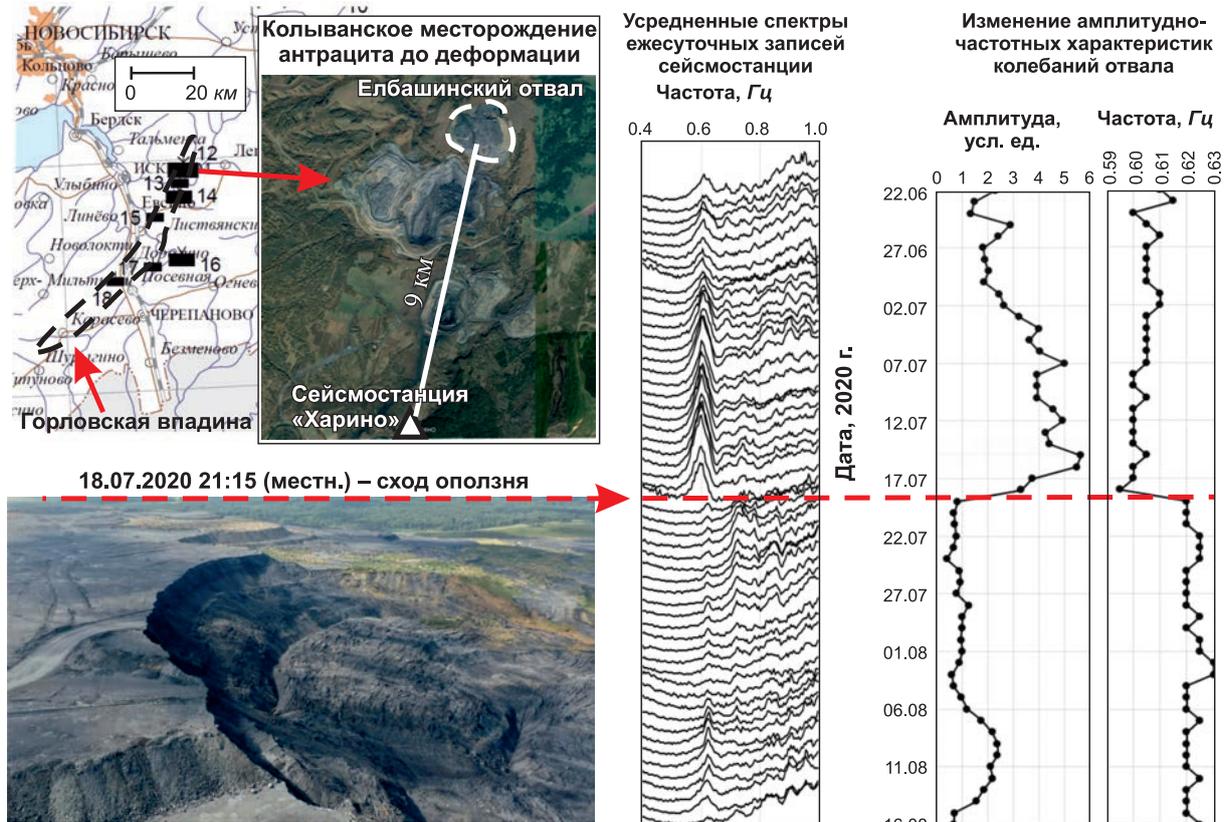


Рис. 10. Изменения собственных колебаний отвала до и после схода оползня на Колыванском месторождении антрацита

Для подробного рассмотрения изменений характеристик исследуемых колебаний до и после схода оползня были построены наборы усреднённых спектров за односуточные интервалы (рис. 10). Наиболее интересны колебания с частотой около 0.6 Гц , которые прослеживались непрерывно на всех компонентах записи и прервались после схода оползня. Видно, что примерно за 20 дней до деформации происходил постепенный рост амплитуд колебаний, а за два дня до оползня — их снижение. Это вполне могут быть собственные колебания Елбашинского отвала, если для оценки значений частот руководствоваться методикой [Бат, 1980]. Так, линейные размеры объекта, имеющего первую собственную частоту $f=0.6 \text{ Гц}$, могут составлять $L=V/2f$, где при скорости $V=2.6 \text{ км/с}$, $L\approx 2.2 \text{ км}$. Эта величина хорошо совпадает с размерами отвала.

Процессы, происходящие на Елбашинском отвале до и после деформации, с учётом анализа спутниковых снимков и записей сейсмической станции «Харино» объясняются следующим образом. По фотографии оползня видно, что он распространился, подобно грязевому потоку, на расстояние, в разы превышающее высоту отвала. Такое могло произойти только при условии, что породы были сильно обводнены. Как следует из космических снимков, основание отвала находилось на отметке 185 м над уровнем моря. Перед оползнем единственный дренажный канал находился на уровне 219 м , превышение составило 34 м . Площадь отвала более 2 км^2 , отсюда можно оценить, что в нём находилась вода объёмом не менее 7 млн. м^3 (при среднем водонасыщении 10%), которая и вытекла из тела отвала вместе с породой. Обводнение отвала являлось причиной его неустойчивости, что выражалось в его долговременных колебаниях с частотой 0.6 Гц , характеристики которых изменились после деформации. Сход оползня привёл к уменьшению массы отвала, и этим объясняется увеличение частоты колебаний, которое составило около 3% . На столько же должна была уменьшиться масса отвала, если на характеристики колебаний не повлияли другие факторы. После деформации огромные массы воды вместе с породой вытекли из тела отвала и это привело к увеличению жёсткости основания, что проявилось в резком уменьшении амплитуд колебаний. Вероятно, уже после оползня какая-то часть воды постепенно продолжала выходить из отвала. Этим можно объяснить, что колебания полностью затихли примерно через месяц после события. Обводнение отвала и является основной причиной воз-

никновения оползня. Так как анализ записей сейсмологической сети, окружающей месторождение, не выявил значимых сейсмических воздействий, можно полагать, что данная деформация возникла по сценарию «последней капли».

Таким образом, анализ данных космических снимков и сейсмологических записей позволил высказать предположения о вероятной причине возникновения и развития оползня на Елбашинском отвале Колыванского месторождения антрацита, связанной с его сильным обводнением.

Возможности речной сейсморазведки для изучения глубинного строения земной коры

Специалисты СЕФ ФИЦ ЕГС РАН на протяжении ряда лет проводили сейсморазведочные работы методом ОГТ-2D на реках Восточной Сибири (Лена, Витим, Нижняя Тунгуска). Начиная с 2007 г., технология сбора полевых сейсмических данных основывалась на использовании автономных регистраторов (типа «Байкал»), настроенных на непрерывную запись и устанавливаемых вдоль профиля на берегу реки. Возбуждение упругого сигнала производилось в воде с помощью пневматических источников, объединённых в группу. Важная особенность такой технологии состоит в том, что излучатели и приборы регистрации работают независимо друг от друга. Сейсмические регистраторы осуществляют запись в непрерывном режиме. При этом они, как и пневмоизлучатели, синхронизированы во времени с помощью систем ГЛОНАСС/GPS. В процессе полевых работ формируется набор табличных данных, позволяющих привести в однозначное соответствие время срабатывания группы источников и начало полезной записи сигнала на каждом из автономных регистраторов. Разработано специализированное программное обеспечение (ПО «SSlicer»), позволяющее выполнять монтаж сейсмограмм с приведением их к виду, аналогичному записям, получаемым стандартными многоканальными сейсморазведочными станциями. Длительность записи таких сейсмограмм определена геологическим заданием и составляет, как правило, от 6 до 10 с . Связано это с тем, что задание ориентировано на получение сведений только о верхней части земной коры. При этом глубинное строение огромных территорий Восточной Сибири до настоящего времени мало изучено ввиду высокой затратности исследований.

Интервал между сейсмическими воздействиями в речной сейсморазведке, как правило, составляет не менее 15 с (обычно $18\text{--}23 \text{ с}$).

Он обусловлен, прежде всего, производственной необходимостью — для нагнетания сжатого воздуха в пневмоисточники и для перемещения судна-источника на следующий пункт возбуждения. В связи с этим появляется возможность, используя непрерывные записи сейсмических регистраторов «Байкал», сформировать сейсмограммы соответствующей длительности. Целевые отражённые волны от глубинных слоёв земной коры, включая поверхность Мохоровичича (далее — граница М), по имеющимся исследованиям методом ГСЗ в Восточной Сибири находятся на временах до 13–14 с. Таким образом ожидается, что сформировав сейсмограммы с увеличенным временем регистрации, можно без существенных затрат строить временные разрезы и изучать глубинное строение земной коры на участках обработки речных сейсморазведочных профилей.

В результате проведения экспериментальных полевых работ вдоль русла р. Лена, Витим и Нижняя Тунгуска на профилях общей длиной около 2700 км (рис. 11) получен и хранится

в архивах значительный объём цифровых сейсмических данных: непрерывные записи пневмоисточников с интервалом между воздействиями 15–25 с. В данной статье на примере участка профиля, расположенного в нижнем течении р. Лена, обосновывается возможность использования данных речной сейсморазведки для изучения глубинного строения земной коры на всю глубину, включая границу М.

Экспериментальной базой исследования являются наборы непрерывных сейсмических записей, полученных автономными регистраторами «Байкал-7» с вертикальными сейсмоприёмниками «GS-One», расставленными по берегу реки (рис. 12). Для анализа выбран 60-километровый участок профиля (от 130 до 190 км регионального профиля, рис. 12а). Исследования проводились в рамках полевых сейсморазведочных работ, выполненных в нижнем течении р. Лена в 2018 году. Источники возбуждения — группа из десяти пневмоисточников «Малыш».



Рис. 11. Схема профилей речной сейсморазведки МОГТ-2D, по которым имеются архивные данные для переинтерпретации с целью изучения глубинного строения земной коры

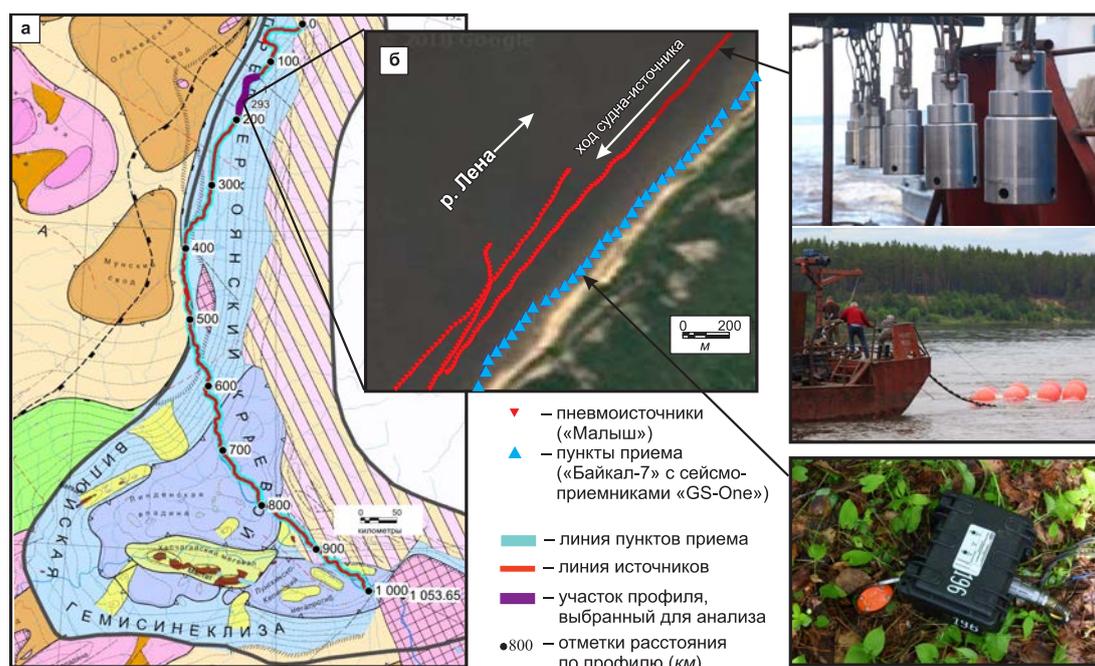


Рис. 12. Схема обработки речного сейморазведочного профиля на р. Лена в 2018 г.: а — профиль на структурно-тектонической карте, составленной в АО «СНИИГГиМС» (<http://www.sniiggims.ru/maps/strtect.html>); б — детальная схема обработки на основе спутникового снимка (<https://www.google.ru/maps/>)

Выполнение монтажей сейсмограмм с использованием непрерывных записей регистраторов «Байкал» производится следующим образом. Исходная запись содержит серию сейсмических импульсов от воздействий пневмоисточников с известным временем срабатывания. Как правило, интервал между ними — от 18 до 23 с. Разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее формировать монтажи сейсмограмм (ПО «Slicer»). Длина записи на результирующей сейсмограмме задана геологическим заданием исходя из глубинности исследований и составляла в данном случае 6 с. Кроме этого, геологическим заданием были ограничены и максимальные расстояния между источниками и приёмниками — до 8000 м. Подобные сейсмограммы, ограниченные по времени и максимальным расстояниям, являясь результатом полевых сейморазведочных работ, сдавались заказчику работ. Исходные непрерывные записи до настоящего времени не использовались, однако были сохранены в цифровых архивах и находятся в ФИЦ ЕГС РАН. Таким образом, есть техническая возможность формировать сейсмограммы с большими удалениями источник-приёмник и большей длительности, вплоть до интервала между воздействиями.

Сведения об изученности района исследований методом глубинного сейсмического зонди-

рования (ГСЗ) содержатся в работе [Атлас ..., 2013]. Речной сейморазведочный профиль не пересекается профилями ГСЗ, они проходят на расстояниях в 30–70 км с севера и с юга. Таким образом, глубинное строение данного участка Приверхоянского прогиба ранее не было изучено.

Ввиду отсутствия сведений о глубинном строении земной коры на выбранном участке речного сейморазведочного профиля, была построена приближённая скоростная модель по данным с ближайших профилей ГСЗ («Шпат» и «Горизонт»): глубина до границы М меняется в пределах 42–46 км, а средняя скорость продольных волн составляет 6.6–6.7 км/с. По этим данным можно оценить, до каких времён на разрезах ОГТ следует ожидать проявлений отражающих границ — они составляют от 12.5 до 13.7 с.

Анализ сейсмограмм, полученных при речных сейморазведочных исследованиях, показал, что на временах порядка 13–14 с отражённые волны не наблюдаются — их амплитуда значительно ниже фона сейсмического шума. Вероятно, что для их выделения требуется применять многократное суммирование по методу ОГТ. Мы провели оценку максимальной кратности, при которой возможно выделение малоамплитудных сигналов из шумов, путём сравнения амплитудных спектров микросейсмических колебаний, записанных регистратором «Байкал-7», оснащённым

вертикальным сейсмоприёмником «GS-One», и спектров аппаратного шума. Последние были получены путём выполнения записи с горизонтальным положением сейсмоприёмника. Эксперимент показал, что амплитуда сейсмического шума в целом на два порядка выше, чем у аппаратного. Отсюда можно полагать, что если в цифровой записи присутствует сигнал с амплитудой меньше сейсмического шума, но больше аппаратного, то его можно выделить при суммировании до 10000 крат.

Высокую кратность можно получить, прежде всего, за счёт увеличения размера бина вдоль профиля. Как правило, при интерпретации данных сейсморазведки указанный размер задаётся равным половине от интервала между пунктами приёма или возбуждения. Так, при обработке сейсморазведочных данных, полученных на р. Лена в 2018 г., он составлял 25 м. При этом ширина бина достигала 2500 м из-за существенной криволинейности речного профиля и разброса средних точек (рис. 13). Кратность суммирования изменялась в целом от 400 до 600 (рис. 13а). Для изучения глубокозалегающих границ (в десятки километров) размер бина вдоль профиля можно существенно увеличить, что приведёт к росту кратности. Как пример на рис. 13б показана кратность, получившаяся после бинирования фрагмента профиля площадками размером 200×2500 м. Видно, что кратность существенно увеличилась — в целом до 5000. Следует отметить, что увеличение размера бина не только повышает кратность, но и одновременно приводит к уменьшению детальности разреза. Поэтому при обработке данных следует подобрать оптимальное значение размеров площадки бинирования. Опытным путём, за счёт построения разрезов с различными параметрами бинирования, мы установили, что для использования данных оптимальным является использование площадок размером 100×2500 м, при которых на временном разрезе проявляется граница М, а средняя кратность на исследуемом фрагменте профиля составила около 2500.

При последующей обработке данных с исследуемого фрагмента речного сейсморазведочного профиля путём подбора параметров мы установили следующее.

1. Оптимальный частотный диапазон полосовой фильтрации составляет 5–10 Гц, а видимая частота колебаний, соответствующих границе М, около 8 Гц. Отсюда сделан вывод, подтверждённый расчётами, что ветровые помехи с частотами 20–40 Гц, иногда присутствующие на сейсмограммах, не влияют на качество временного разреза в отличие от региональной сейсморазведки, где частоты полезных сигналов составляют несколько десятков Гц;

2. Неточное определение скоростной модели для расчёта кинематических поправок в данном случае не критично. Это связано с относительно небольшими удалениями источник-приёмник (в целом до 10 км) по сравнению с мощностью земной коры (лучи отражённых волн почти вертикальные), а также с низкой частотой полезного сигнала. Так, использование различных значений скоростей от 6 до 7 км/с до времён 13–14 с не привело к каким-либо качественным различиям в получаемых разрезах.

На рис. 14 представлен временной разрез, построенный на основании всех имеющихся данных для выделенного 60-километрового участка профиля в нижнем течении р. Лена. Пунктирной линией отмечено предполагаемое положение границы М. Двойное время пробега меняется от 13.0 до 14.2 с, тогда, в предположении, что средняя скорость продольных волн в земной коре на данном участке составляет около 6.7 км/с, глубина до М достигает 44–48 км. Таким образом показано, что используемая современная технология речных сейсморазведочных исследований позволяет изучать строение не только верхней части, но и всей земной коры, включая поверхность Мохоровичича.

Заключение

Коллективом Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН при проведении исследований за последние пять лет получены следующие важнейшие результаты.

На примере крупнейшей в России арочной плотины Чиркейской ГЭС разработан способ мониторинга собственных частот по данным непрерывных сейсмических наблюдений. На основе детального изучения собственных колебаний определены особенности сезонных изменений полного поля стоячих волн и установлены факторы, вызывающие изменения значений собственных частот, но не связанные с опасными для сооружения процессами. Главным образом они вызваны изменениями уровня водохранилища. Построены эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать текущие значения собственных частот плотины, при условии, что её техническое состояние остаётся стабильным. Предложена методика мониторинга состояния плотины: в случае появления в плотине и/или в её основании дефектов, способных вызвать аварию (трещины, ослабленные участки горных пород), ожидаются изменения значений наблюдаемых собственных частот по сравнению с прогнозными.

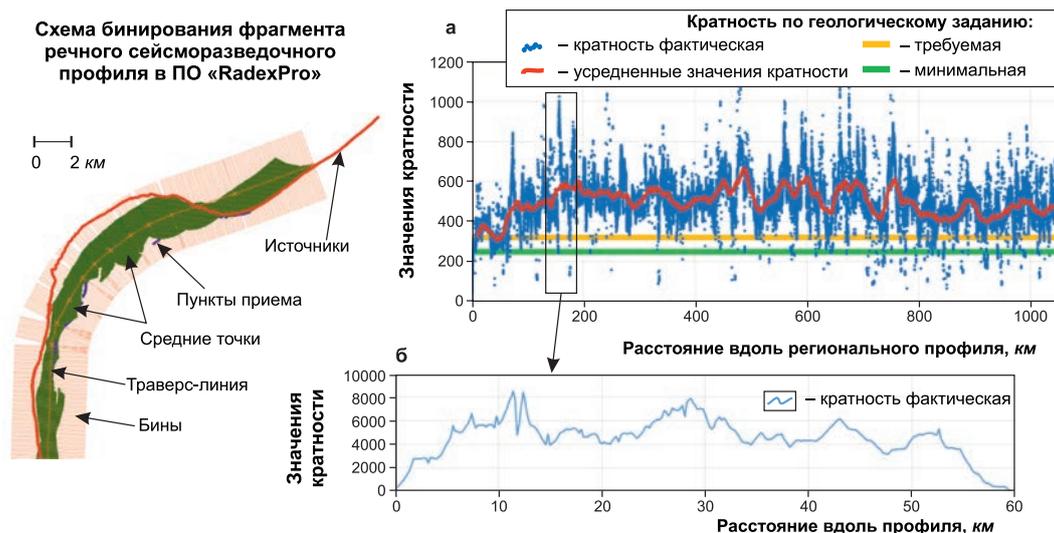


Рис. 13. Схема бинирования фрагмента речного сейсморазведочного профиля и графики кратности: а – при размере бина 25×2500 м и ограничении максимальных удалений 8000 м; б – при размере бина 200×2500 м и неограниченных удалениях

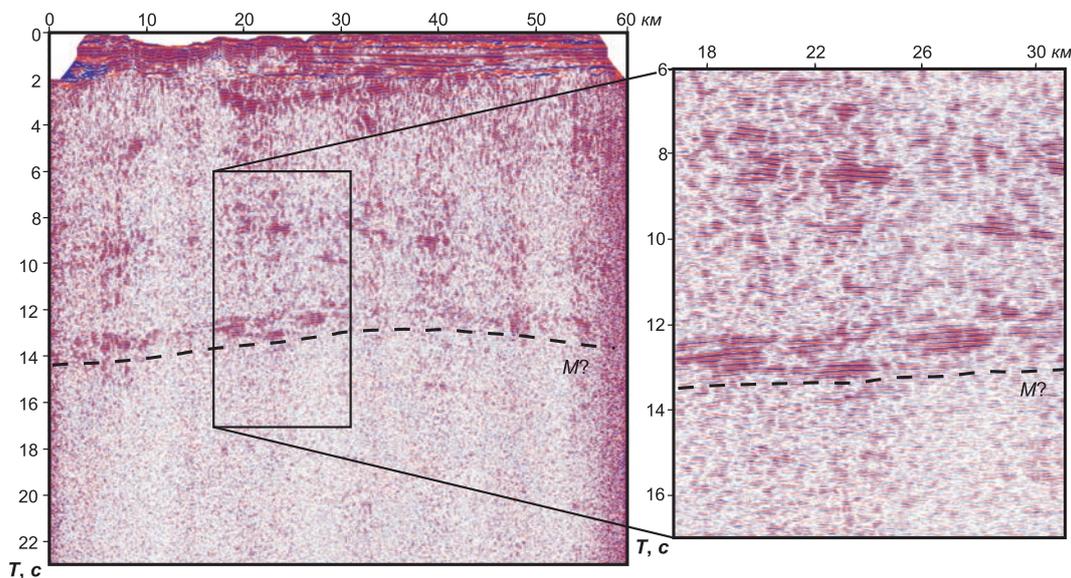


Рис. 14. Временной разрез, построенный для исследуемого фрагмента речного сейсморазведочного профиля

В результате проведённых исследований с использованием данных регистрации сейсмических колебаний, возникающих при работе в различных режимах гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС, удалось выделить собственные (органные) колебания жидкости в водоводах и определить их частоты. Это даёт возможность верифицировать результаты теоретических расчётов параметров гидроакустических колебаний проточных частей гидротурбин. Установлено, что при подаче воздуха в водовод частоты собственных гидроакустических колебаний меняются в широких пределах, причём по-разному при различных нагрузках на гидроагрегатах. Опреде-

лено, что данные колебания являются основным фактором, влияющим на возбуждение собственных колебаний плотины.

Предложен способ оценки реакции зданий и сооружений на сейсмические воздействия в основании, заключающийся в использовании результатов их детального обследования методом когерентного восстановления полей стоячих волн для расчёта теоретических сейсмограмм в различных точках объекта. С использованием экспериментальных данных на крупном инженерном сооружении – бетонной арочно-гравитационной плотине СШГЭС – показано, что теоретические сейсмограммы в целом соответствуют

по амплитуде реальным записям в верхней части сооружения.

Анализ данных космических снимков и сейсмологических записей позволил высказать предположение о причине возникновения и развития оползня на Елбашинском отвале Колыванского месторождения антрацита как формирования значительных горизонтальных колебаний в теле отвала, которые при сильном обводнении последнего спровоцировали сход оползня.

Показано, что используемая современная технология речных сейсморазведочных исследований позволяет изучать строение не только верхней части, но и всей земной коры, включая поверхность Мохоровичича. Для выделения малоамплитудных колебаний отражённых волн используется многократное (несколько тысяч) суммирование, существенно большее, чем при традиционной сейсморазведке. Используемая аппаратура имеет достаточный динамический диапазон, а высокая кратность достигается за счёт увеличения площадки бинирования.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам Дагестанского филиала ФИЦ ЕГС РАН и лично З.А. Адилову за организацию и участие в проведении экспериментальных исследований на Чиркейской ГЭС и специалистам Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН за предоставленный первичный материал по сейсмостанциям. Авторы признательны коллегам Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН, принимавшим активное участие в исследованиях, и персонально А.А. Брыкшину, П.В. Громыко, Д.В. Кречетову и И.В. Коковкину.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01304-20-01/09) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России. Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ,

отработанным в период с 1972 по 1995 год. Электронное издание». – СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. – 94 с. – URL: <http://www.vsegei.com/ru/info/seismic/> (дата обращения: 08.02.2021).

Бат М. Спектральный анализ в геофизике. – М.: Недра, 1980. – 535 с.

Егоров А.Ю., Костылев В.С., Саранцев М.И. Определение собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС по показаниям сейсмометрической аппаратуры и расчётными методами // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 8. – С. 45–50.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнев В.С., Фатеев А.В. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г., $M_L=6.7$ и 26.02.2012 г., $M_L=6.8$ и их афтершоки // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 456, № 2. – С. 223–226.

Еманов А.Ф., Красников А.А., Бах А.А., Черных Е.Н., Еманов А.А., Семин А.Ю., Черепанов А.В. Резонансные свойства верхней части разреза // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 26–36.

Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татков Г.И. Пересчёт стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 2. – С. 192–207.

Красников А.А. Разработка упругой модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС для интерпретации стоячих волн // Восьмая Уральская молодёжная научная школа по геофизике: Сборник научных материалов. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2007. – С. 134–138.

Кузьменко А.П., Бортников П.Б., Сабуров В.С. Контроль технического состояния бетонных плотин по динамическим характеристикам их колебаний // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2007. – Т. 248. – С. 64–76.

Савич А.И., Бронштейн В.И., Бовенко В.Г., Грошев М.Е., Гашин А.Н., Ильин М.М. Результаты динамических испытаний плотины Чиркейской ГЭС методом собственных малоамплитудных колебаний // Юбилейный сборник научных трудов Гидропроекта. – 2000. – Вып. 159. – С. 373–382.

Pereira S., Magalhães F., Gomes J.P., Cunha A., Lemos J.V. Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir // Engineering Structures. – 2018. – V. 174, N 1. – P. 548–560.

Сведения об авторах

Лисейкин Алексей Владимирович, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотр. Сейсмологического филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: lexik1979@mail.ru

Селезнев Виктор Сергеевич, д-р геол.-мин. наук, директор СФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: sel@gs.sbras.ru

Most important results of the scientific activity of the Seismological Division GS RAS in 2016–2020 (seismic research)

© 2021 A.V. Liseikin, V.S. Seleznev

SED GS RAS, Novosibirsk, Russia

Received February 16, 2021

Abstract The article presents the most important results of seismic studies carried out in 2016–2020 at the Seismological Division GS RAS. Work at the Chirkey's HPP, where natural oscillations of the dam and their seasonal changes were studied in detail and a method for monitoring the natural frequencies of the structure was developed. Research at the Sayano-Shushenskaya HPP, where the processes of interaction of operating hydroelectric units with surrounding structures were studied and it was found that under certain operating conditions of the equipment, there is a 10–20-fold increase in the natural oscillations of the dam, the source of which is natural oscillations (organ vibrations) in the penstocks. A method has been developed for assessing the response of structures to seismic impacts, based on the method of coherent reconstruction of standing wave fields and allowing to calculate the vibrations of an object arising from seismic impacts at its base. The possibilities of determining the natural vibrations of large objects based on low-frequency seismological records and their monitoring are demonstrated on the example of the results of the analysis of satellite images and seismological materials when determining the causes of the landslide on the Elbashinsky dump of the Kolyvan anthracite deposit in the Novosibirsk region. The possibility of using river seismic data to study the structure of the earth's crust at all depth, including the Moho boundary, has been substantiated using the example of data obtained during the development of the CDP-2D profile in the lower reaches of the river Lena.

Keywords Chirkey's and Sayano-Shushensk HPPs, natural oscillations of dams, monitoring of natural frequencies, seismic impacts on structures, river seismic exploration.

For citation Liseikin, A.V., Seleznev, V.S. (2021). [Most important results of the scientific activity of the Seismological Division GS RAS in 2016–2020 (seismic research)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(1), 54–74. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.04>

References

- Atlas "Opornye geologo-geofizicheskie profili Rossii. Glubinnye seismicheskie razrezy po profiliam GSZ, otrabotannym v period s 1972 po 1995 god. Elektronnoe izdanie"* [Atlas "Reference geological and geophysical lines in Russia". Deep seismic sections along DSS lines acquired from 1972 to 1995. Electronic edition]. (2013). St. Petersburg: VSEGEI Publ., 94 p. Available from: <http://www.vsegei.ru/> (In Russ.).
- Bat, M. (1980). *Spektral'nyi analiz v geofizike* [Spectral analysis in geophysics]. Moscow, Russia: Nedra Publ., 535 p. (In Russ.).
- Egorov, A.Yu., Kostylev, V.S., & Sarantsev, M.I. (2016). [Determination of the natural frequencies of the dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station according to the readings of seismometric equipment and calculation methods]. *Hydraulic engineering* [Hydraulic engineering], 8, 45–50. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Leskova, E.V., Seleznev, V.S., & Fateev, A.V. (2014). [Tuva earthquakes on December 27, 2011, ML=6.7 and February 26, 2012, ML=6.8 and their aftershocks]. *Reports of the Academy of Sciences* [Doklady Earth Sciences], 456(2), 223–226. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Krasnikov, A.A., Bakh, A.A., Chernykh, E.N., Emanov, A.A., Semin, A.Yu., & Cherepanov, A.V. (2008). [Resonant properties of the upper part of the geological section]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical mesomechanics], 11(1), 26–36. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Seleznev, V.S., Bakh, A.A., Gritsenko, S.A., Danilov, I.A., Kuz'menko, A.P., Saburov, V.S., & Tat'kov, G.I. (2002). [Recalculation of standing waves for detailed engineering and seismological studies]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 43(2), 192–207. (In Russ.).
- Krasnikov, A.A. [Elastic model development of the Sayano-Shushenskaya HPP dam for the interpretation of standing waves]. In *Vos'maia Ural'skaia molodezhnaya*

nauchnaia shkola po geofizike [Eighth Ural Youth Scientific School in Geophysics: Collection of Scientific Materials] (pp. 134-138). Perm, Russia: MIRAS Publ. (In Russ.).

Kuzmenko, A.P., Bortnikov, P.B., & Saburov, V.S. (2007). [Technical state control for concrete dams on dynamic characteristics of their oscillations]. *Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva* [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.Ye. Vedeneev], 248, 64-76. (In Russ.).

Pereira, S., Magalhães, F., Gomes, J.P., Cunha, A., & Lemos, J.V. (2018). Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir. *Engineering Structures*, 174(1), 548-560.

Savich, A.I., Bronshtein, V.I., Bovenko, V.G., Groshchikov, M.E., Gashin, A.N., & Il'in, M.M. (2000). [Results of dynamic tests of the Chirkeyskaia HPP dam by the method of low-amplitude natural oscillations]. In *Iubileinyi sbornik nauchnykh trudov Gidroproekta* [Anniversary collection of scientific works of Hydroproject], 159, 373-382. (In Russ.).

Information about authors

Liseikin Aleksei Vladimirovich, PhD, Leading Researcher of the Seismological Division of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (SED GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: lexik1979@mail.ru

Seleznov Viktor Sergeevich, Dr., Director of the SED GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: sel@gs.sbras.ru