

УДК 550.34

Определение частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам (на примере плотины Саяно–Шушенской ГЭС по данным мониторинга 2001–2021 гг.)

© 2023 г. А.В. Лисейкин¹, В.С. Селезнев¹, А.Ф. Еманов², Д.В. Кречетов¹

¹СФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия; ²АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.

Аннотация. На основе спектрального анализа записей малоамплитудных сейсмических сигналов с удалённой на 4.4 км от Саяно–Шушенской ГЭС одной из станций сейсмологической сети разработана методика определения ежедневных значений частот собственных колебаний сооружений. Частоты первых семи мод определяются с погрешностью не более 0.01 Гц по непрерывным данным мониторинга 2001–2021 гг. Результаты обработки и анализа уникальных данных указывают на продолжительный и не замедляющийся рост значений частот собственных колебаний плотины в пределах 0.02–0.05 Гц за период наблюдений. Это объясняется или заиливанием дна водоёма на участке, примыкающем к плотине, или адаптацией плотины и её основания с последующим увеличением механической жёсткости сооружения. При этом анализируются интервалы, при которых влияние на сооружение сезонных воздействий внешней среды незначительно (летне-осенний период, уровень воды в водохранилище близок к максимальному). Разработанная методика определения частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам предназначена для контроля их технического состояния с целью предупреждения рисков разрушения плотин, промышленных сооружений, объектов инфраструктуры и гражданских зданий с высокой степенью достоверности и экономически выгодна по сравнению с известными решениями.

Ключевые слова: методика определения частот собственных колебаний, малоамплитудные сейсмические сигналы, контроль технического состояния сооружений.

Для цитирования: Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кречетов Д.В. Определение частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам (на примере плотины Саяно–Шушенской ГЭС по данным мониторинга 2001–2021 гг.) // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 32–50. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.03>. – EDN: AAVYDU

Введение

Контроль технического состояния зданий, инженерных конструкций и сооружений по данным сейсмического мониторинга представляет существенный практический интерес в части предупреждения рисков их разрушения. Несомненно, что воздействие таких факторов, как изменение температуры, смена напряжённо-деформированного состояния, вибрация, старение материалов конструкций и др., с течением времени приводит к появлению в сооружениях трещин, ослабленных зон, изменению граничных условий на контакте с внешней средой и др. Как следствие, ослабляется устойчивость сооруже-

ний, а риск их разрушения в сейсмоактивных регионах особенно велик. Перечисленные изменения в конструкции сооружений, в свою очередь, становятся причиной изменения характеристик их собственных колебаний, в том числе значений частот. В связи с этим регулярное определение частот собственных колебаний сооружений с выделением их аномальных изменений даёт возможность контролировать их техническое состояние и своевременно предупредить риск их разрушения.

На сегодня известны разные способы определения частот собственных колебаний сооружений. Например, по зарегистрированным колебаниям, вызванным воздействием искусственных

источников типа вибратор, или вследствие промышленных взрывов [Loh, Wu, 2000; Mendes et al., 2007], или в результате природных землетрясений [Weng, Loh, 2010]. Трудоёмкие и затратные способы с искусственными источниками, особенно в случае крупных сооружений (таких как плотины ГЭС), нечасто используются для решения задач оперативного контроля технического состояния сооружений. Редко применяются способы, основанные на записях природных землетрясений, в силу невозможности прогнозирования времени и места их возникновения. Тем не менее они реализуются с получением некоторой информации о техническом состоянии конструкций, хотя и с недостаточной точностью [Weng, Loh, 2010]. Известны также способы определения частот собственных колебаний сооружений по зарегистрированным фоновым микросейсмическим колебаниям объекта [Селезнев и др., 1999]. Они основаны на известном факте, что практически в любом инженерном сооружении из-за его ограниченного объёма при воздействии микросейсм формируется совокупность стоячих волн [Emanov et al., 2002]. В исследованиях ряда авторов частоты собственных колебаний сооружений определяются по локальным максимумам спектров сейсмических записей, зарегистрированных в нескольких точках сооружения [Egorov et al., 2017; Antonovskaya et al., 2017]. Этот способ прост в реализации, но из-за сложности геометрической формы стоячих волн в сооружениях возможны ошибки в идентификации их мод. Кроме того, на полезный сигнал могут накладываться колебания от работающего в сооружении оборудования, а при расположении датчиков в области узлов стоячих волн определить их частоты практически невозможно [Liseikin et al., 2020]. Разработанным В.С. Селезевым и А.Ф. Емановым методом когерентного восстановления полей стоячих волн из зарегистрированных микросейсмических колебаний выделяются когерентные во времени и пространстве колебания (стоячие волны) на сколь угодно плотной сети наблюдений [Emanov et al., 2002]. Это даёт возможность определять детальные моды для каждой из частот собственных колебаний и исключает ошибки в их идентификации. Однако такой метод требует, прежде всего, больших временных, а также материальных затрат на регистрацию колебаний на плотной сети наблюдений, на обработку цифровых данных и интерпретацию результатов и не подходит для оперативного и регулярного (например, ежедневного) определения значений частот собственных колебаний сооружений.

Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС является самой крупной в России. Расположена в зоне высокой сейсмической активности (9 баллов по карте ОСР-97С). Плотина представляет важный объект исследования её собственных колебаний, которые в результате природной сейсмичности и техногенного воздействия могут изменяться. Важно разработать новые подходы, позволяющие контролировать техническое состояние не только этой плотины, но и любых других инженерных сооружений для предупреждения рисков их разрушения. Известны исследования 1993–1995 гг. материалов, полученных с использованием мощного дебалансного вибратора [Брызгалов, 1999]. В 1997–1998 гг. выполнены исследования методом когерентного восстановления полей стоячих волн [Emanov et al., 2002], по результатам анализа которых определены частоты собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при минимальном и максимальном заполнении водой водохранилища (таблица). Из анализа табличных данных следует, что при максимальном уровне воды значения частот первых семи мод собственных колебаний плотины на 0.1–0.2 Гц меньше, чем при минимальном. Специалистами такая разница в значениях частот объясняется общеизвестным «эффектом присоединённой массы»: чем выше уровень воды в водохранилище, тем больше совместная масса плотины с присоединённой водой, следовательно, частоты собственных колебаний сооружения становятся меньше [Брызгалов, 1999; Egorov et al., 2017]. Обращает внимание разница в значениях частот, определённых при одном и том же уровне воды в водохранилище, но в разные годы она составляет от 0.005 до 0.072 Гц. В публикациях [Брызгалов, 1999; Emanov et al., 2002] не даётся объяснения, чем она вызвана: это или недостаточная точность определения частот, или влияние на значения частот дополнительных факторов, не учтённых исследователями. Вместе с тем, из анализа результатов численного конечно-элементного моделирования колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС следует, что при появлении трещин в модели сооружения частоты собственных колебаний понижаются на величину до 0.05 Гц относительно их значений в модели без трещин [Hsu et al., 2020]. Из этого следует вывод, что для контроля технического состояния этой плотины необходимы более полные и точные данные о значениях частот её собственных колебаний.

Таблица. Значения частот первых семи мод собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по результатам других исследователей [Брызгалов, 1999; Еманов et al., 2002]

Номер моды	Значения при максимальном уровне воды, Гц		Разница частот, Гц	Значения при минимальном уровне воды, Гц		Разница частот, Гц
	Исследования 1993–1995 гг. [Брызгалов, 1999]	Исследования 1997–1998 гг. [Еманов et al., 2002]		Исследования 1993–1995 гг. [Брызгалов, 1999]	Исследования 1997–1998 гг. [Еманов et al., 2002]	
1	1.10	1.129	–0.029	1.25	1.236	0.014
2	1.20	1.217	–0.017	1.33	1.325	0.005
3	1.50	1.527	–0.027	1.65	1.633	0.017
4	1.85	1.921	–0.071	2.00	2.035	–0.035
5	2.40	2.448	–0.048	2.50	2.531	–0.031
6	2.90	2.972	–0.072	3.10	3.064	0.036
7	3.60	3.635	–0.035	3.70	3.679	0.021

В последнее десятилетие (начиная с 2014 г.) ведётся непрерывный мониторинг колебаний в ряде точек плотины Саяно-Шушенской ГЭС автоматизированной системой сейсмометрического контроля, установленной по заказу ПАО «РусГидро». Известны исследования по определению частот собственных колебаний плотины по спектрам микросейсмических колебаний, записанных этой системой [Саранцев, 2017]. Однако до 2014 г. такой мониторинг не проводился из-за отсутствия непрерывно регистрирующей аппаратуры. Вместе с тем, изменение технического состояния плотины, связанное, например, со старением материалов конструкции, как известно, длится годами, даже десятилетиями.

Результаты исследования [Лисейкин и др., 2014] показывают, что плотина Саяно-Шушенской ГЭС, колеблющаяся на частотах собственных колебаний, является источником упругих волн с такими же частотами. Эти волны распространяются в среде и фиксируются станциями сейсмологической сети на расстояниях даже в несколько километров, несмотря на их существенно более низкую амплитуду (на несколько порядков ниже) по сравнению с общим уровнем микросейсмического шума. Спектральный анализ сейсмического шума, зарегистрированного на сейсмостанции «Черёмушки» в 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, показывает, что по локальным максимумам спектров, усреднённых за длительный период времени (до пяти суток), определяются частоты, соответствующие значениям частот первых семи мод собственных колебаний плотины [Лисейкин и др., 2014]. Сейсмические записи со станций сейсмологической сети ФИЦ ЕГС РАН передаются в обрабатывающие

центры оперативно (большинство станций передают в режиме реального времени). Они хранятся в цифровом виде неограниченное время (с момента ввода в эксплуатацию современной цифровой регистрирующей аппаратуры дватри десятилетия назад), что даёт возможность выполнять их обработку и интерпретацию для регулярного определения частот собственных колебаний сооружения за многолетний период мониторинга. Это актуально как для оперативного, так и для длительного контроля за изменением технического состояния плотины под воздействием таких факторов, как старение материалов конструкции, растрескивание горных пород в основании плотины, их обводнение, заиливание dna водохранилища в области примыкания к плотине и др.

Из публикаций [Еманов et al., 2002; Nguyen et al., 2017; Pereira et al., 2018; Liseikin et al., 2020; Cai et al., 2021] известно, что определяемое при мониторинге изменение частот собственных колебаний сооружений вызывается не только разрушительными процессами в конструкции (старением материалов, появлением различных дефектов), но и под воздействиями внешней среды, как правило, сезонного характера. Так как Саяно-Шушенская ГЭС расположена в регионе, где среднемесячные температуры зимой – до -20°C , а летом – до $+20^{\circ}\text{C}$, то это обстоятельство необходимо учитывать (в дополнение к воздействиям от колебания уровня воды в водохранилище), поскольку частоты собственных колебаний изменяются при изменении температуры материалов конструкций [Cai et al., 2021]. Кроме того, исследователями отмечается, что изменение частот собственных колебаний сооружений при смене температур с отрицательных

на положительные и наоборот (при промерзании/оттаивании материалов конструкций) имеет свои особенности, существенно затрудняет их учёт [Nguyen et al., 2017].

В настоящем исследовании по многолетним цифровым записям на одной из станций сейсмологической сети Алтае-Саянского региона – «Черёмушки» (международный код CERR), расположенной в 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, определяются частоты первых семи мод собственных колебаний плотины за период 2001–2021 гг. Для цифровой обработки данных используется специальное программное обеспечение [Селезнев и др., 2021], основанное на алгоритмах, разработанных в исследовании [Лицейкин и др., 2014]. Выявлено с высокой детальностью и точностью изменение частот собственных колебаний плотины под воздействием внешней среды, таким как сезонные изменения уровня воды в водохранилище и температуры воздуха.

Использованные данные, методы исследования, аппаратура

Исходной информацией для регулярного определения значений частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС служат данные мониторинга (2001–2021 гг.) со станции «Черёмушки» (международный код CERR) локальной сейсмологической сети станций района Саяно-Шушенской и Майнской ГЭС, принадлежащей ПАО «РусГидро», цифровые сейсмические записи которой исследуются сейсмологами Алтае-Саянского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (АСФ ФИЦ ЕГС РАН) [Еманов и др., 2022]. Используемая геофизическая аппаратура с 2001 по 2012 г. – регистраторы серии «Байкал» с сейсмометрами СМ-3КВ (Россия); с 2013 г. по настоящее время – широкополосные велосиметры SMG-3ESPCDE производства компании Guralp (Великобритания). Сейсмостанция расположена в 4.4 км к северо-востоку от Саяно-Шушенской ГЭС на территории одноимённого посёлка (рис. 1). Также при анализе используются материалы, полученные (в том числе авторами статьи) в 2010–2014 гг. при регистрации в ряде точек плотины микросейсмических колебаний с помощью мобильных сейсмических регистраторов серии «Байкал». Эти колебания регистрируются в разное время года в течение нескольких дней для идентификации малоамплитудных сигналов от плотины, одновременно зарегистрированных сейсмостанцией «Черёмушки». При анализе изме-

нения частот собственных колебаний плотины в связи с изменением уровня воды в водохранилище используются значения уровня воды в верхнем бьефе, предоставленные сотрудниками ПАО «РусГидро» (до 2016 г.) и заимствованные с Интернет-ресурса (<http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/>) (с 2016 по 2021 г.).

Из-за удалённости сейсмостанции «Черёмушки» от ГЭС (в 4.4 км от неё) и повышенной сейсмической активности региона сейсмические записи «зашумлены» всевозможными помехами техногенного и природного происхождения, затрудняющими выделение малоамплитудных сигналов от собственных колебаний плотины и определение их частот (рис. 2а). Для повышения достоверности их выделения применяются следующие способы цифровой обработки данных, разработанные [Лицейкин и др., 2014] и реализованные в специальном программном обеспечении SpectrumSeism [Селезнев и др., 2021]. Прежде всего записи традиционно очищаются от высокоамплитудных помех (от движущегося транспорта, от природных или техногенных землетрясений и др.) обнулением участков записей с амплитудами колебаний выше фоновых значений. Затем полезный сигнал накапливается: сейсмическая запись разделяется на ограниченные по времени блоки, для каждого блока с использованием преобразования Фурье вычисляются единичные амплитудные спектры и усредняются. На усреднённых амплитудных спектрах (рис. 2б), рассчитанных с ростом длины записи микросейсмического шума и ростом количества усреднений от 100 с (количество усреднений одно) до 51200 с (количество усреднений 512), видно, что при длине записи от 12800 с (около четырёх часов, 128 усреднений) спектры сглаживаются и с дальнейшим увеличением длины записи не меняются.

Из результатов спектрального анализа записи микросейсмического шума на станции «Черёмушки» следует вывод, что аргументы локальных максимумов усреднённых амплитудных спектров (рис. 2б) соответствуют частотам собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Для строгого доказательства этого вывода сопоставляются усреднённые амплитудные спектры от одновременных записей сейсмического шума, зарегистрированных в двух точках плотины (рис. 3а) и на сейсмостанции «Черёмушки» (рис. 3б,в). Из сопоставления спектров с двух разнесённых в плотине точек регистрации (рис. 3а) следует, что амплитуды колебаний плотины отличаются. Это происходит из-за различного положения точек

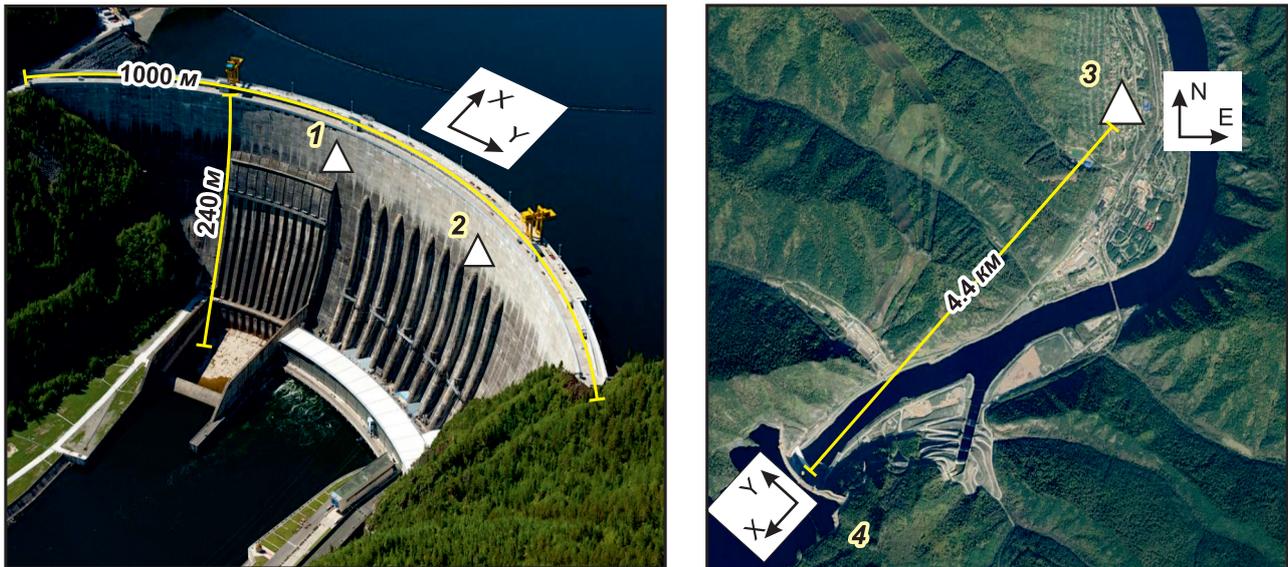


Рис. 1. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС (<https://wikimapia.org/>) и расположение её и сейсмостанции «Черёмушки» на снимке со спутника (<https://earth.google.com/>).

Автономные сейсмические регистраторы серии «Байкал» для временной (несколько дней) регистрации сигналов (1, 2); станция «Черёмушки» сейсмологической сети для постоянной регистрации сигналов (обслуживается АСФ ФИЦ ЕГС РАН) (3); плотина Саяно-Шушенской ГЭС (4)

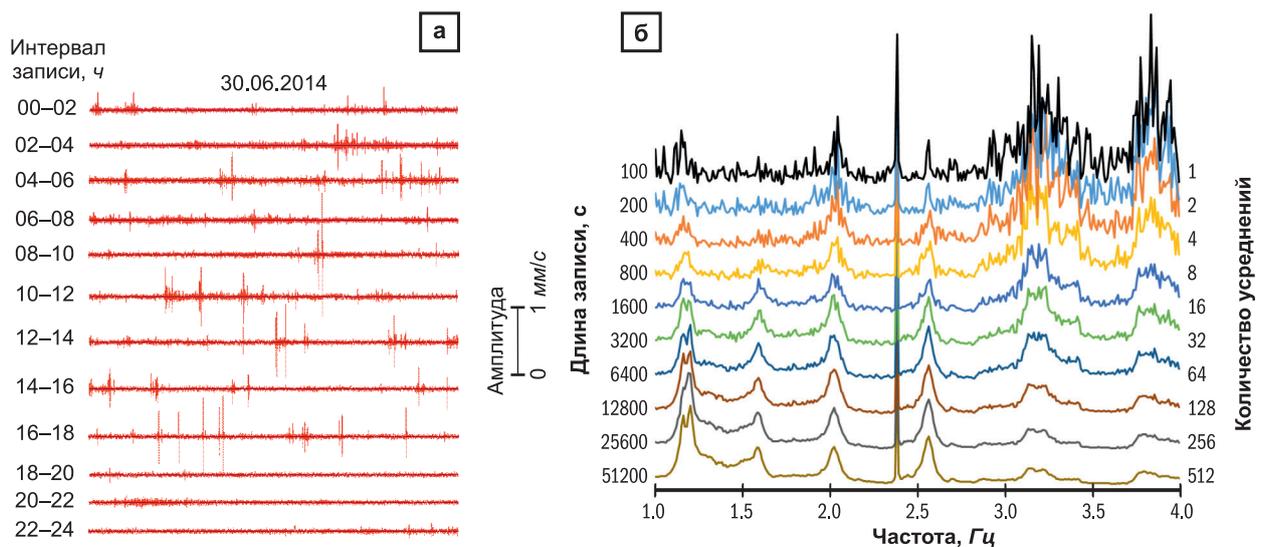


Рис. 2. Суточная запись микросейсмического шума на E -компоненте сейсмостанции «Черёмушки» (а), и набор усреднённых амплитудных спектров с ростом длины записи и количества усреднений (б)

регистрации относительно узлов и пучностей стоячих волн (где амплитуда минимальна и максимальна соответственно). Для большей достоверности определения частот каждой из мод собственных колебаний их значения берутся с тех точек, где амплитуда локального максимума принимает наибольшее значение (такие точки расположены в местах, отличных от узлов соответствующей моды стоячей волны). На усреднённых спектрах (рис. 3б,в) микросейсмиче-

ского шума, зарегистрированного на сейсмостанции «Черёмушки», видно, что аргументы локальных максимумов совпадают с таковыми при одновременной регистрации сейсмического шума в плотине (рис. 3а). Причём наиболее точно совпадают (разница не превышает 0.01 Гц) при сопоставлении с локальными максимумами среднеквадратичных значений амплитуд усреднённых спектров по трём компонентам (N , E , Z) записи. Это отчётливо видно на графике

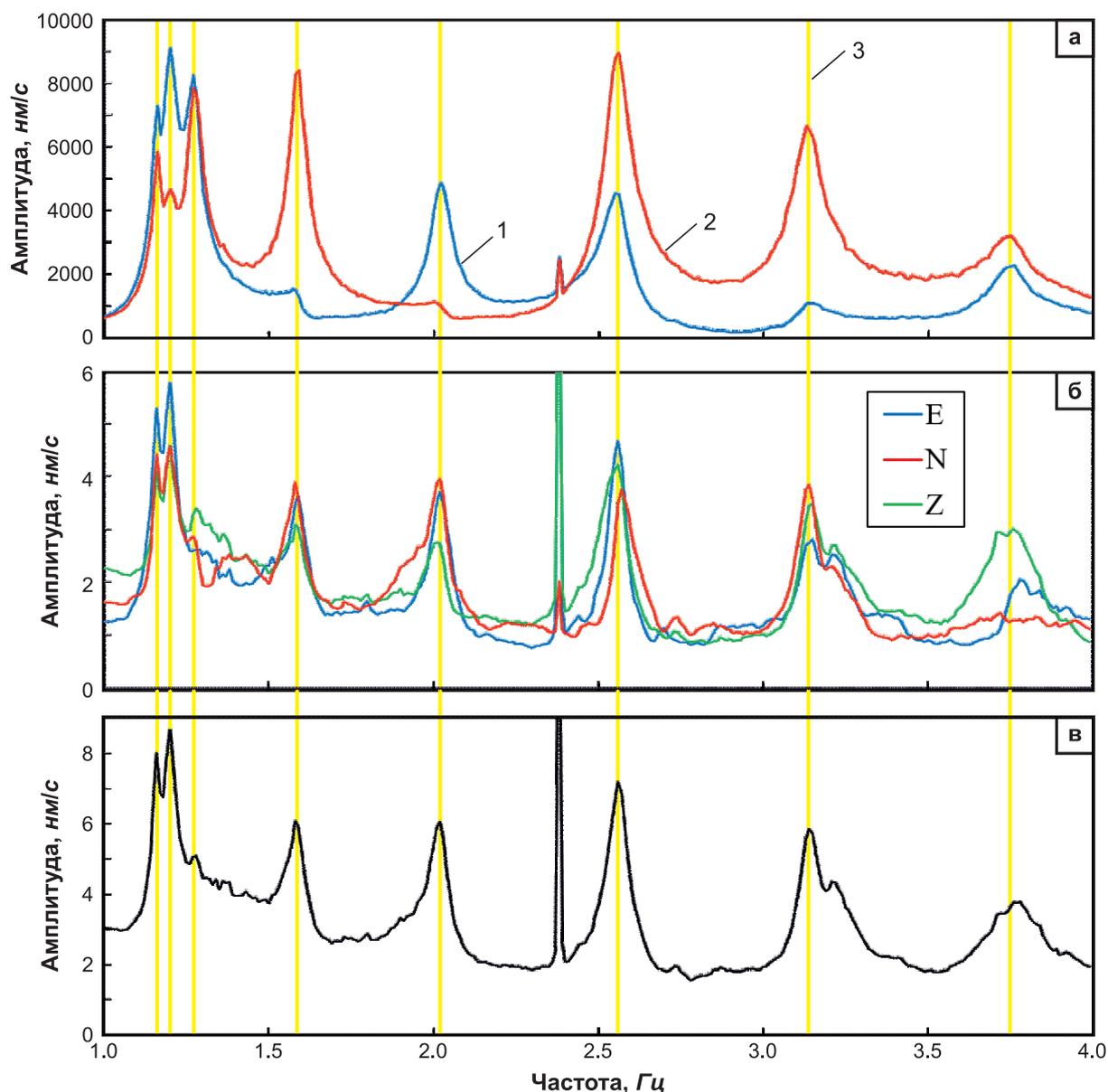


Рис. 3. Усреднённые амплитудные спектры суточной записи микросейсмических шумов в плотине Саяно-Шушенской ГЭС (а) и на сейсмостанции «Черёмушки» (б, в) при одновременной регистрации 30.06.2014 г.: а – радиальная *X*-компонента в точках 1 (1) и 2 (2) на рис. 1 с выделенными локальными максимумами спектров (3); б – три (*E*, *N*, *Z*) компоненты записи сейсмостанции; в – график среднеквадратичных значений амплитуд спектров по трём компонентам

(рис. 3в). Таким образом, из сопоставления усреднённых спектров одновременных записей сейсмического шума в плотине и на удалённой в 4.4 км от неё сейсмостанции «Черёмушки» следует, что по записям последней (а именно, по локальным максимумам усреднённых амплитудных спектров микросейсмического шума) определяются частоты собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС.

Погрешность значений частот собственных колебаний плотины оценивается по разности их определений в дневное (с 08:00 до 20:00)

и ночное (с 20:00 до 08:00) время суток (рис. 4). Из графиков изменения частоты 4-й моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС, определённой ежесуточно по спектрам микросейсмического шума сейсмостанции «Черёмушки» в дневное и ночное время 2021 г. с изменением уровня воды в водохранилище (рис. 4а), видно, что они почти идеально совпадают: из анализа гистограммы их разности (рис. 4б) следует, что погрешность определения частот незначительна и не превышает 0.01 Гц.

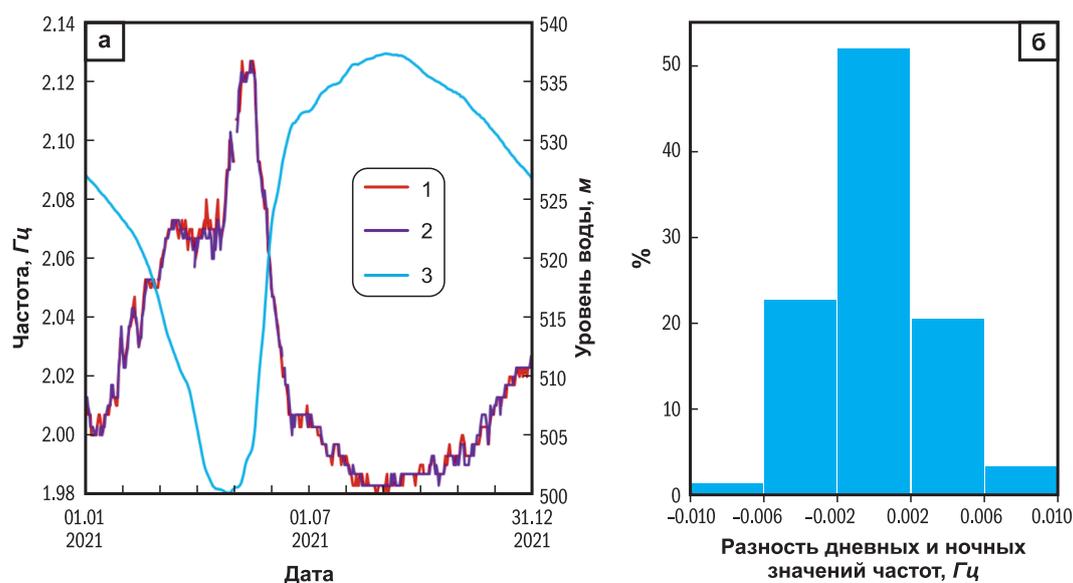


Рис. 4. Изменение частоты 4-й моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по спектрам микросейсмического шума сейсмостанции «Черёмушки» с изменением уровня воды в водохранилище (а), и гистограмма разности дневных и ночных значений частот (б) за 2021 г.

1, 2 – значения частот в дневное и ночное время; 3 – уровень воды

Количество спектров, необходимое для построения сглаженного усреднённого спектра (рис. 2б, 3б), зависит как от уровня помех, так и значений амплитуд «полезных» малоамплитудных сигналов. В известном исследовании [Селезнев и др., 2013] доказывалось, что в разное время суток, в зависимости от режимов работы гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС (количества вырабатываемой электроэнергии), амплитуда собственных колебаний плотины значительно меняется (кратность изменения достигает 10–20 раз). На графике (рис. 5) видно, что соотношение между амплитудами спектров записей микросейсмического шума, зарегистрированных в плотине и на сейсмостанции в 4.4 км от ГЭС, фактически линейное, а значит, амплитуда «полезного» малоамплитудного сигнала, регистрируемого на сейсмостанции «Черёмушки», также пропорционально меняется в широких пределах (от единиц до десятков нм/с) в разные даты и время суток. Следовательно, для выделения «полезных» малоамплитудных сигналов по усреднённым амплитудным спектрам микросейсмического шума в разное время требуется разное количество спектров, участвующих в усреднении: например, при уменьшении амплитуды сигнала в 10 раз необходимо их количество увеличить в 100 раз. Амплитуда помех, регистрируемых в разное время суток и года, меняется в существенно более широких пределах – от десятков нм/с до нескольких

мм/с . Такой значительный разброс связан с эпизодическим присутствием в записях волн от землетрясений с высокой амплитудой (например, амплитуда колебаний, вызванных Тувинским землетрясением 26.02.2012 г. на горизонтальных компонентах сейсмостанции «Черёмушки», достигала 2 мм/с). Тем не менее, такие высокоамплитудные помехи достаточно кратковременны по сравнению с общим временем регистрации сейсмического шума (обычно, не более 1%, если не брать во внимание периоды регистрации афтершоковых активизаций после Чуйского землетрясения 2003 г. и Тувинских землетрясений 2011–2012 гг.). После очистки сейсмограмм от таких высокоамплитудных помех амплитуда сейсмического шума изменяется в значительно меньших пределах – от десятков до первых сотен нм/с . Из анализа спектров записей микросейсмического шума, зарегистрированных в разное время года, следует, что для надёжного выделения на сейсмостанции «Черёмушки» сигналов, связанных с собственными колебаниями плотины Саяно-Шушенской ГЭС (при условии очистки сейсмограмм от высокоамплитудных помех), количество спектров, участвующих в усреднении, не превышает 500–1000. При этом необходимая длина сейсмической записи для расчёта таких спектров и итогового усреднённого спектра составляет 0.5–1 сутки.

При вычислении единичных спектров (до их усреднения описанным выше способом)

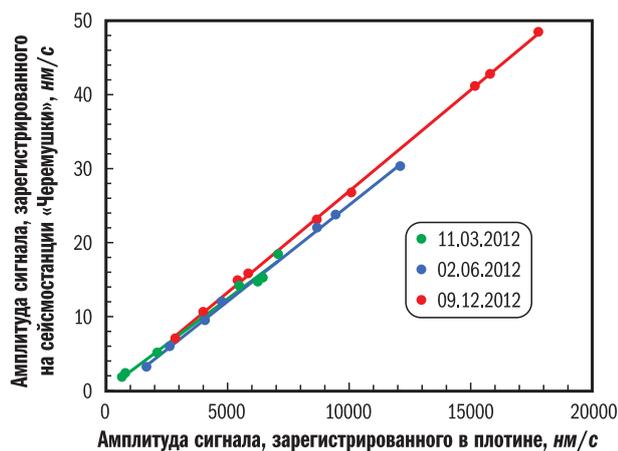


Рис. 5. Линейная связь между амплитудами сигнала (амплитуда локальных максимумов спектров микросейсмического шума в области частоты 3.7–3.8 Гц) при одновременной его регистрации в верхней части плотины Саяно-Шушенской ГЭС и на сейсмостанции «Черёмушки» для трёх разных дат в разное время года

необходимо знать критерии оценки временного интервала сейсмической записи, по которым они вычисляются: общеизвестно, что разрешённость спектра по частоте обратно пропорциональна длине временного интервала указанной записи. Следовательно, чем длиннее временной интервал, тем точнее определяется значение частот собственных колебаний (при отсутствии помех) с одной стороны. С другой стороны, при длинном временном интервале уменьшается количество усреднений (при той же общей длине записи), а значит, уменьшается и соотношение «сигнал/помеха», спектры становятся менее гладкими и, как следствие, снижается качество определения значений частот. Для минимизации этого определяется оптимальный временной интервал для расчёта единичного спектра записи микросейсмических колебаний следующим образом. При исследовании собственных колебаний сложных объектов, имеющих ряд степеней свободы и соответствующий ряд резонансных областей в частотной характеристике, разрешённость спектра соотносится с шириной этих резонансных областей и расстоянием по частоте между ними. Разрешённость спектра находится из сопоставления усреднённых амплитудных спектров записи микросейсмического шума в верхней части плотины, рассчитанных при разном временном интервале для единичного спектра. На графиках (рис. 6) видно, что при временном интервале 10, 25 и 50 с усреднённые амплитудные спектры существенно «изломаны», и это не позволяет точно

определять значение частоты. А при интервале 25 с и менее разрешённость спектра становится настолько низкой, что не позволяет различить сигналы, близкие по частоте. Поэтому временной интервал для вычисления единичных спектров, при котором разрешённость спектра высокая и составляет 0.01 Гц, выбирается, как минимум, 100 с.

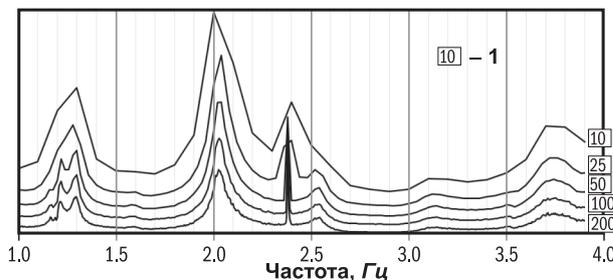


Рис. 6. Амплитудные спектры записи микросейсмических колебаний на поперечной (в направлении X) компоненте в точке 1 (рис. 1) плотины Саяно-Шушенской ГЭС при разной длине временного интервала для единичного спектра в результате усреднения (регистрация 06.02.2015).

1 – длина временного интервала для единичного спектра, с

На графиках изменения во времени частот первых семи мод собственных колебаний плотины, определённых описанным выше способом по усреднённым спектрам микросейсмического шума, зарегистрированного в течение 20 лет на сейсмостанции «Черёмушки» (рис. 7б–з), видна их ежегодная периодичность, как и периодичность изменения уровня воды в водохранилище над уровнем моря (рис. 7а). При этом разброс частот составляет 0.16–0.22 Гц при изменении уровня воды на 35–39 м в разные годы в связи с разным гидрологическим режимом Саяно-Шушенского водохранилища. При линейной аппроксимации значений частот собственных колебаний плотины отмечается их увеличение в течение 20-летнего периода наблюдений по предварительной оценке на 0.02–0.03 Гц, что на порядок ниже значений их вариаций. При этом аппроксимированные значения уровня воды в водохранилище не изменяются за тот же временной период, несмотря на неодинаковость его изменения из года в год (рис. 7а). Отсюда следует вывод, что для повышения степени достоверности контроля технического состояния плотины по изменениям частот её собственных колебаний необходимо учитывать влияние сезонных факторов на значения частот.

На графиках зависимости частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС от уровня воды в водохранилище за 20-летний период наблюдений на примере 1–7-й мод (рис. 8) видно, что в целом (при линейной аппроксимации величин) с повышением уровня воды частота её колебаний снижается. Как уже отмечалось, специалистами это объясняется эффектом «присоединённой массы» воды (чем выше уровень

воды, тем больше масса колебательной системы, состоящей из плотины с присоединённой водой, и тем ниже частота собственных колебаний, соответственно) и доказывается другими исследователями по однократным определениям частот при максимальном и минимальном уровне воды [Брызгалов, 1999; Еманов *et al.*, 2002], а также по определениям частот собственных колебаний плотины по данным мониторинга

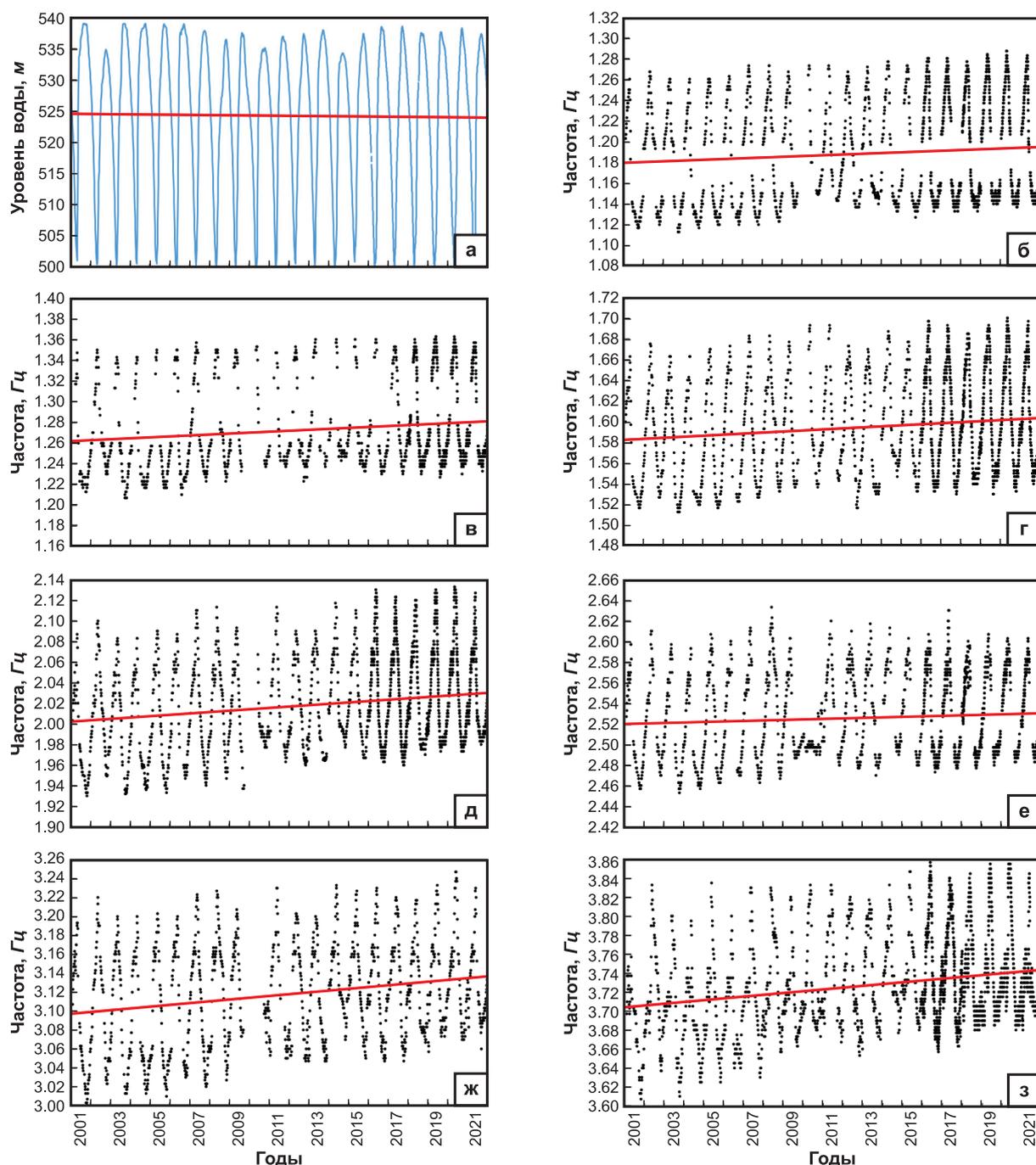


Рис. 7. Изменение уровня воды в водохранилище (а) и частот с 1-й по 7-ю моду собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС (б–з) за период 2001–2021 гг.; линейная аппроксимация их значений (красная линия)

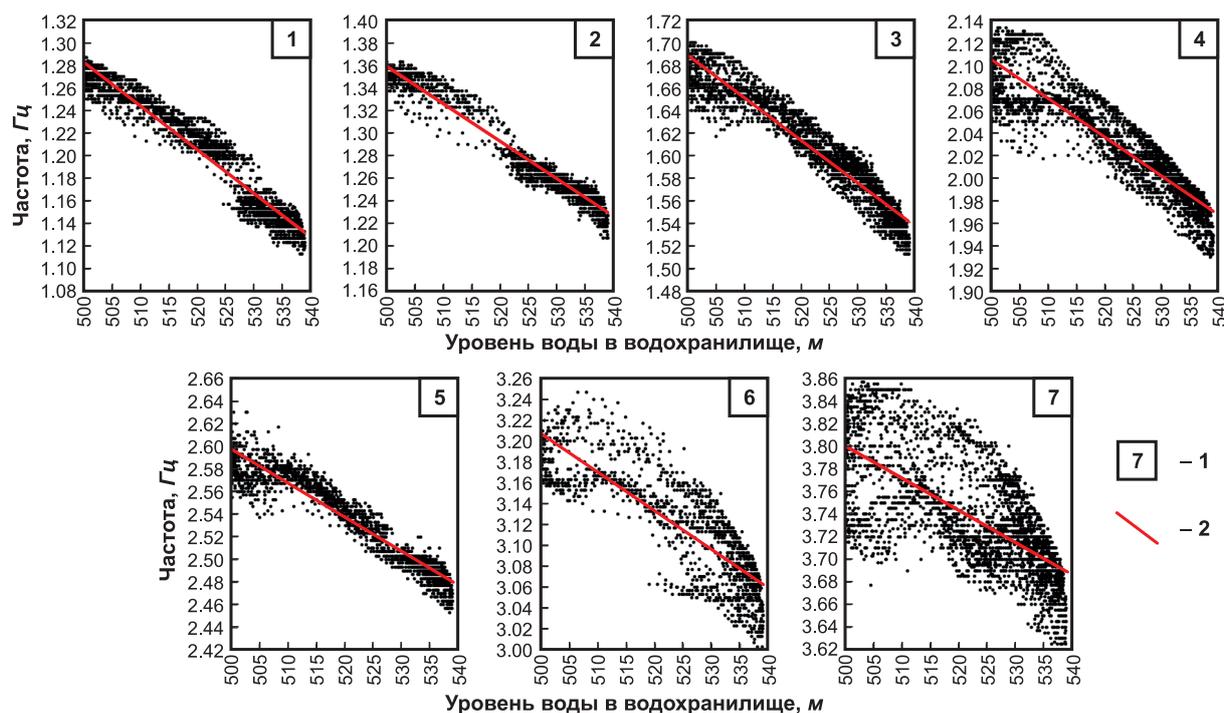


Рис. 8. Зависимости частот 1–7-й мод собственных колебаний плотины от уровня воды в водохранилище за 20-летний период наблюдений по спектрам записей микросейсмического шума на сейсмостанции «Черёмушки».

1 – номер соответствующей моды; 2 – линейная аппроксимация зависимостей

в период 2016–2017 гг. [Саранцев, 2017]. Некоторыми исследователями (например, [Pereira et al., 2018]) при определении частот собственных колебаний плотин по данным мониторинга этот эффект учитывается с помощью корректирующей функции, зависящей только от уровня воды в водохранилище. Однако из анализа всей совокупности данных (ежедневных определений значений частот собственных колебаний плотины за 20-летний период мониторинга) следует, что связь между частотой и уровнем воды неоднозначна: при одном и том же уровне воды разброс частот составляет 0.04–0.14 Гц (разброс отличается как от моды к моде, так и от уровня воды на момент регистрации колебаний) при погрешности их определения не более 0.01 Гц. Это указывает на то, что изменение значений частот собственных колебаний плотины происходит не только от изменения уровня воды, но и от воздействия других факторов.

Так, М.И. Саранцевым доказывается, что дополнительным фактором изменения значения частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС может быть замерзание воды в водохранилище [Саранцев, 2017]. Отсюда следует вывод, что и промерзание/оттаивание бетона самой плотины в зимнее/весеннее время влияет на частоту колебаний: она уменьшается или

увеличивается. Результаты анализа изменения частот собственных колебаний плотины во времени за 20 летний период мониторинга это подтверждают. Из сопоставления графиков изменения частоты 4-й моды собственных колебаний плотины и уровня воды в водохранилище (рис. 9) следует, что в период с декабря по март, когда приток воды замедляется и уровень воды монотонно понижается (значит, частота должна увеличиваться, так как присоединённая масса уменьшается), частота собственных колебаний в ряде случаев, напротив, снижается на 0.02–0.03 Гц, а по прошествии одного-двух месяцев снова увеличивается. Это объясняется воздействием на плотину нескольких факторов в зимнее и весеннее время года, при этом достоверность результата контроля технического состояния плотины по частотам её собственных колебаний снижается в связи с неразработанностью способа учёта указанных изменений частот. В частности, масса намёрзшего на плотине льда постоянно изменяется, так как снижение уровня воды в водохранилище при отрицательных температурах воздуха регулярно приводит как к дополнительному намерзанию, так и к отколу льда под действием силы тяжести. Глубина промерзания бетона на различных уровнях плотины также отличается в зависимости как

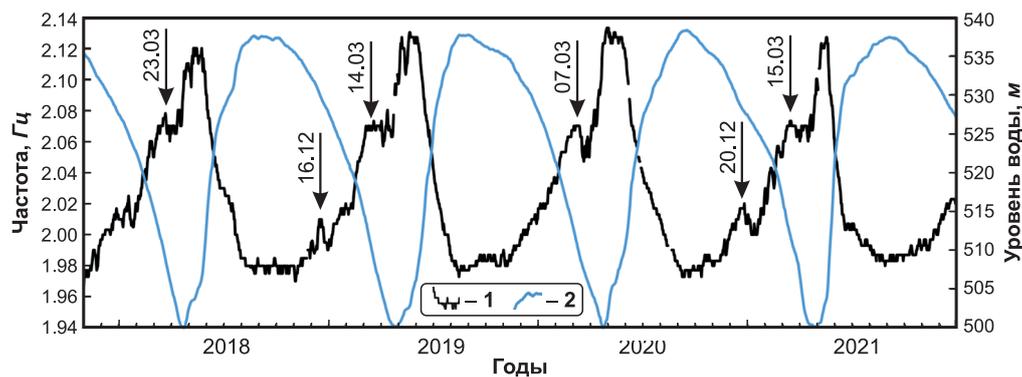


Рис. 9. Изменение во времени частоты собственных колебаний 4-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС (1) с сезонным изменением уровня воды в водохранилище (2).

Стрелками отмечены дополнительные изменения частоты

от температуры окружающего воздуха, так и от уровня воды в водохранилище на момент регистрации колебаний. В связи с этим частота собственных колебаний плотины на фоне её плавного роста дополнительно меняется (уменьшается или увеличивается на $0.02\text{--}0.03\text{ Гц}$) в холодное время года (начиная с декабря по март) (рис. 9). Однако при мониторинге частот собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС в других климатических условиях (без замерзания воды и промерзания бетона в зимнее время) описанное дополнительное изменение частот не отмечается [Liseikin et al., 2020].

Из сопоставления графиков изменения частоты собственных колебаний плотины с сезонным изменением уровня воды в водохранилище (рис. 9) следует, что максимумы первых изменений запаздывают по времени относительно минимумов вторых. Аналогичное соотношение отмечается в изменении частоты собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС и уровня воды: по результатам многомесячного мониторинга (с октября 2015 по декабрь 2016 г.) установлено, что изменение частоты запаздывает относительно сезонного изменения уровня воды в водохранилище на 5–11 суток [Liseikin et al., 2020]. Это отчётливо видно на графиках (рис. 10) по петлевидному соотношению частот собственных колебаний плотин Саяно-Шушенской, Чиркейской ГЭС и уровня воды, разделённых по годам. Так, на графике изменения частоты собственных колебаний 4-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС (рис. 10а) видно, что при одном и том же уровне воды, но в разное время года, определяются два значения частоты (например, при уровне 505 м – 2.06 и 2.13 Гц ; при уровне 525 м

– 2.01 и 2.05 Гц и т.д.). Причём во время наполнения водохранилища значения частоты более высокие, а во время понижения уровня воды (сработке) – пониженные. Так же, как и в случае с плотиной Чиркейской ГЭС (рис. 10б), это запаздывание изменения частоты собственных колебаний сооружения относительно изменения уровня воды объясняется тепловой инертностью бетона: изменение уровня воды в водохранилище длится не один месяц, за это время происходит существенное изменение среднемесячной температуры окружающего воздуха, а именно от минус $10\text{--}20^\circ\text{C}$ – при сработке в зимнее время до плюс $10\text{--}20^\circ\text{C}$ – при наполнении в летние месяцы (рис. 11).

В результате анализа представленного на графике (рис. 10а) изменения частоты собственных колебаний 4-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС в связи с изменением уровня воды в разное время года, а также сезонного изменения уровня воды и изменения среднемесячной температуры воздуха (рис. 11) выделяются четыре условных периода (в изменении частот собственных колебаний остальных мод плотины результаты анализа подобны).

1. Наполнение водохранилища водой с уровня 510 до уровня 530 м происходит, как правило, в течение 2–3 месяцев с мая по июль, характеризуется высокой скоростью наполнения (около $6\text{--}10\text{ м/мес.}$) и, соответственно, высокой скоростью монотонного снижения значений частоты собственных колебаний (около $0.03\text{--}0.05\text{ Гц/мес.}$). В этот период фиксируются положительные среднемесячные температуры (от $+5$ до $+20^\circ\text{C}$), что, несомненно, сопровождается активным прогреванием бетона плотины (после зимне-весеннего времени года).

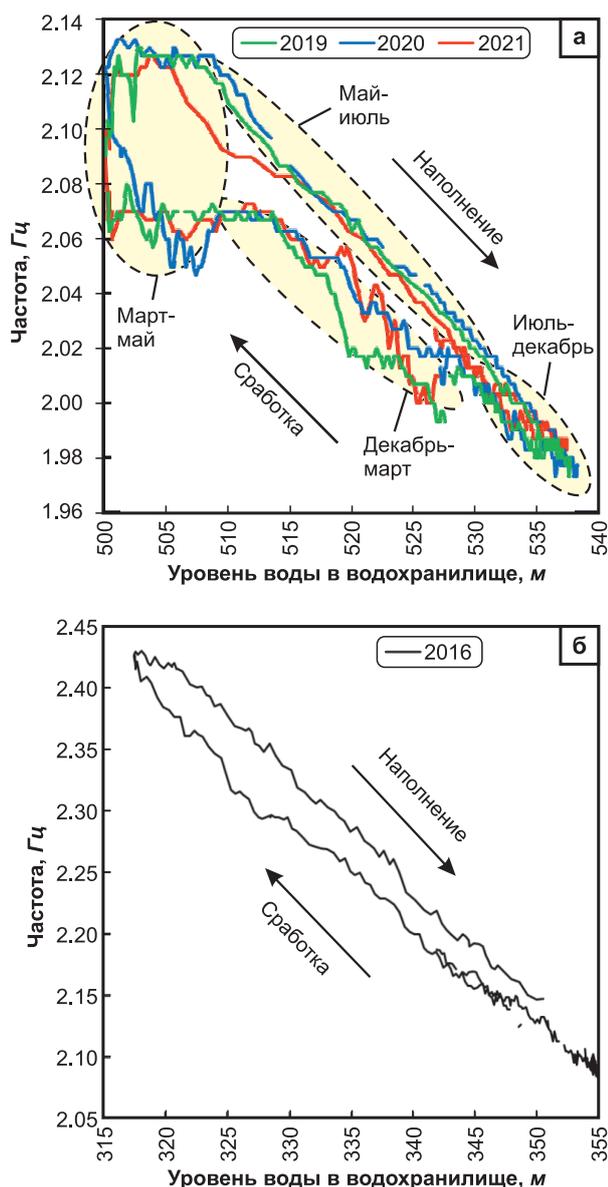


Рис. 10. Изменение частоты собственных колебаний 4-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС (а) и собственных колебаний 1-й моды плотины Чиркейской ГЭС (б) в связи с сезонным изменением уровня воды в водохранилищах

2. Наполнение водохранилища водой с уровня 530 до 535–539 м (в разные годы) и последующая сработка воды до уровня 530 м происходят, как правило, в течение 5–6 месяцев (с июля по декабрь) до замерзания водохранилища. Этот период характеризуется низкой скоростью как наполнения, так и сработки (порядка 2–4 м/мес.) и, соответственно, низкой скоростью изменения частоты собственных колебаний плотины (около 0.01–0.02 Гц/мес.). Частота при этом изменяется монотонно (при увеличении уровня воды – уменьшается, при уменьшении – увеличивается).

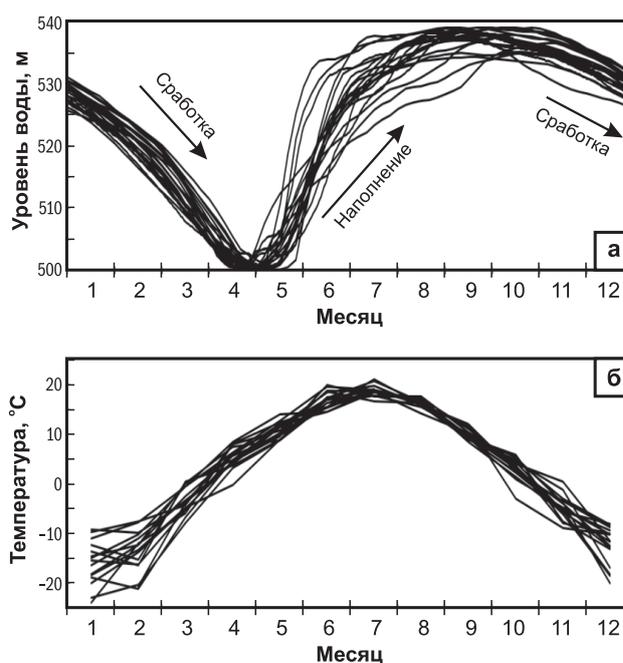


Рис. 11. Графики сезонного изменения уровня воды в Саяно-Шушенском водохранилище по данным мониторинга 2001–2021 гг. (а) и среднемесячной температуры воздуха в 40 км с северо-запада от ГЭС по данным ближайшей постоянно действующей метеостанции в пос. Бея с 2005 по 2021 г. (<https://rp5.ru/>) (б)

3. Сработка воды из водохранилища с уровня 530 до уровня 510 м, происходит, как правило, в течение 3–4 месяцев с декабря по март (период, когда вода замерзает, среднемесячная температура окружающего воздуха составляет от 0 до –25°C). В среднем понижение уровня воды происходит со скоростью 5–6 м/мес., частота собственных колебаний при этом увеличивается со скоростью 0.01–0.02 Гц/мес. Однако в этом периоде изменение частоты не является монотонным: при интегральном увеличении частоты наблюдаются участки, где она внезапно снижается. Такое anomalous явление, как было отмечено выше, объясняется влиянием намерзания и откола льда и неравномерным промерзанием бетона плотины.

4. Сработка воды в водохранилище с уровня 510 до 500 м и последующее наполнение до уровня 510 м происходят, преимущественно, в течение 2–3 месяцев с марта по май. Среднемесячная температура воздуха изменяется с отрицательных (–10°C) до положительных (+15°C) значений, что сопровождается активным оттаиванием льда в водохранилище и прогреванием бетона плотины. При этом фиксируется существенное отличие значений частот собственных колебаний, определённых в период

сработки и наполнения водохранилища, для одного и того же уровня воды. Например, при минимальном её уровне 500 м частота колебаний 4-й моды увеличивается на 0.05 Гц, и это изменение происходит быстро, за считанные дни (в среднем, за 10–15 дней). Из этого следует, что для контроля технического состояния плотины недопустимо использовать значения частот собственных колебаний, определённых при минимальном уровне воды, так как это приведёт к значительным погрешностям.

Итак, из анализа материалов следует вывод, что при определении частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС в разные годы необходимо использовать периоды мониторинга, при которых воздействие факторов внешней среды (прежде всего, температурных изменений) минимально. Этому условию удовлетворяет 2-й период длительностью 5–6 месяцев (с июля по декабрь) с наполнением водохранилища водой от уровня 530 до 535–539 м (в зависимости от степени наполнения в разные годы) и последующей сработкой воды до уровня 530 м. Значение частот собственных колебаний плотины определяется для уровня 535 м (это наименьшее значение из всех максимумов уровней воды в водохранилище за период мониторинга 2001–2021 гг.) как среднее между всеми значениями в интервале уровней 534–536 м.

Полученные новые результаты

По материалам 20-летнего мониторинга записей сейсмического шума на сейсмостанции «Черёмушки» разработана методика определения частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сигналам в связи с контролем их технического состояния, которая базируется на следующей концепции. По данным метода когерентного восстановления полей стоячих волн доказывалось, что частоты, определяемые по локальным максимумам амплитудных спектров записей сейсмического шума на объекте исследования, являются частотами его собственных колебаний. Затем проводится спектрально-временной анализ одновременных записей сейсмостанций, расположенных в нескольких километрах от исследуемого объекта, и записей на самом объекте для идентификации малоамплитудных сейсмических сигналов, связанных с собственными колебаниями объекта, и определения оптимальных параметров цифровой обработки сейсмических записей. Далее по набору статистических данных, полученных в результате обработки сейсмических записей многолетне-

го мониторинга, и их ретроспективному анализу определяются закономерности в изменениях частот собственных колебаний в связи с воздействиями внешней среды, такими как изменение температуры, изменение уровня воды в периоды наполнения и сработки водохранилища, промерзание/оттаивание материалов конструкций и т.п. С учётом найденных закономерностей определяются аномальные изменения частот собственных колебаний сооружений и, как следствие, делаются выводы об изменении их технического состояния, возможных разрушительных процессах из-за старения материалов конструкций, образования трещин, ослабленных зон и т.п.

Методика включает следующие этапы.

1. Методом когерентного восстановления полей стоячих волн определяются единовременные значения частот собственных колебаний сооружения.

2. По результатам спектрального анализа записей сейсмического шума, зарегистрированного в ряде точек на сооружении, доказывалось, что по локальным максимумам амплитудных спектров определяются регулярные (например, ежедневные) значения частоты его собственных колебаний.

3. С использованием преобразования Фурье вычисляются усреднённые амплитудные спектры сейсмического шума при разном временном интервале для единичного спектра. При этом сейсмический шум регистрируется в местах, отличных от узлов стоячих волн.

4. В результате сопоставления полученных спектров определяется минимальная длина записи для единичного спектра, при которой его разрешённость достаточна для определения частот собственных колебаний сооружения с необходимой точностью.

5. По зарегистрированной на удалённой на несколько километров от объекта исследования сейсмостанции трёхкомпонентной записи сейсмического шума с использованием преобразования Фурье вычисляются усреднённые амплитудные спектры с установленной (в п. 4) длиной записи для единичного спектра и от разной общей длины записи (и, соответственно, разного количества усреднений).

6. В результате сопоставления полученных спектров (в п. 5) определяется общая длина записи, необходимая для построения устойчивого усреднённого амплитудного спектра.

7. С использованием преобразования Фурье вычисляются усреднённые амплитудные спектры одновременных записей сейсмического шума на объекте исследования и на удалённой

сейсмической станции (запись очищается от высокоамплитудных помех) с установленными параметрами (п. 4, 6).

8. В результате сопоставления полученных спектров (п. 7) делается заключение, что частоты, определяемые по локальным максимумам усреднённого амплитудного спектра удалённой от сооружения сейсмостанции, являются частотами собственных колебаний сооружения. При этом делается вывод, по какой компоненте (или совокупности компонент) сейсмической записи частоты определяются с большей точностью.

9. По материалам многолетнего мониторинга колебаний в виде непрерывных цифровых записей сейсмического шума, предварительно очищенного от высокоамплитудных помех, после обработки сигналов с установленными параметрами (п. 4, 6 и 8) определяются регулярные (например, ежедневные, если общая длина записи в п. 6 составляет около суток) значения частот собственных колебаний сооружения.

10. Анализируется закономерное изменение определённых частот (в п. 9) в связи с воздействием внешней среды (преимущественно сезонного характера, таких как изменение температуры, промерзание/оттаивание конструкций, изменение уровня воды в водохранилище и т.п.).

11. Для контроля технического состояния сооружений по аномальным изменениям частот их собственных колебаний (предположительно, из-за старения материалов конструкций, образования трещин, ослабленных зон и т.п.) учитывается воздействие внешней среды (п. 10).

С использованием разработанной методики установлено, что частоты собственных колебаний первых семи мод плотины Саяно-Шушенской ГЭС на протяжении последних 20 лет непрерывно возрастают, при этом интегральный рост частот составляет 0.02–0.05 Гц (рис. 12).

Как уже отмечалось, появление трещин в модели сооружения приводит к понижению частот собственных колебаний [Hsu et al., 2020]. Следовательно, отсутствие фактического уменьшения частот даёт основание сделать вывод, что техническое состояние плотины из-за старения материалов конструкций, образования трещин, ослабленных зон и т.п. не ухудшается. Фактическое увеличение частот объясняется или увеличением механической жёсткости плотины, или длительным (десятилетиями) изменением граничных условий, продолжающимися и в настоящее время. В своём исследовании Н.А. Вульфович и Л.П. Потехин доказывают, что плотина Саяно-Шушенской ГЭС в последние годы эксплуата-

ции (начиная с 2013 г.) перешла в так называемое «стабилизированное состояние», что, по данным геодезического мониторинга, проявляется в прекращении роста необратимых перемещений её гребня [Vul'fovich, Potekhin, 2018]. Однако из анализа результатов мониторинга собственных колебаний плотины следует, что рост значений частот первых семи мод не прекращается и до настоящего времени, т.е. процесс, вызвавший этот рост, не стабилизируется. В исследовании других учёных предполагается, что «адаптация плотины к своему основанию в случае плотины Саяно-Шушенской ГЭС продолжается, вместо ожидаемых нескольких лет, гораздо больший срок – 30 лет и более», а также «адаптационный процесс, вероятнее всего, обусловлен реологическими явлениями в бетоне плотины и основании» [Александров, Юсупов, 2018]. Отсюда следует вывод, что наблюдаемый рост значений частот собственных колебаний плотины связан с упомянутыми «адаптационными процессами». Альтернативная версия причины упомянутого явления может быть также связана с заиливанием и накоплением наносов на дне водохранилища на участке, примыкающем к плотине, так как при этом неизбежно меняются граничные условия на контакте плотины и основания. Этот процесс идёт непрерывно, что и вызывает медленное, но регулярное увеличение частот собственных колебаний из года в год. Из публикаций неизвестно, проводились ли исследования по оценке роста мощности наносов именно вблизи плотины, однако некоторыми исследователями доказывается, что процессы разрушения берегов Саяно-Шушенского водохранилища идут непрерывно, а значит наносы вблизи плотины постоянно накапливаются [Кальная, Аюнова, 2014]. Какова бы ни была причина, такой продолжительный и не замедляющийся рост частот собственных колебаний плотины является показателем изменения технического состояния плотины необратимого характера, которое необходимо контролировать, чтобы предупредить её разрушение.

Заключение

Результаты спектрального анализа данных многолетнего мониторинга показывают, что разрушительные процессы при эксплуатации технических сооружений контролируются с использованием разработанной методики, мало затратной при реализации, простой в использовании, которая основывается на выделении и интерпретации малоамплитудных сейсмических сигналов

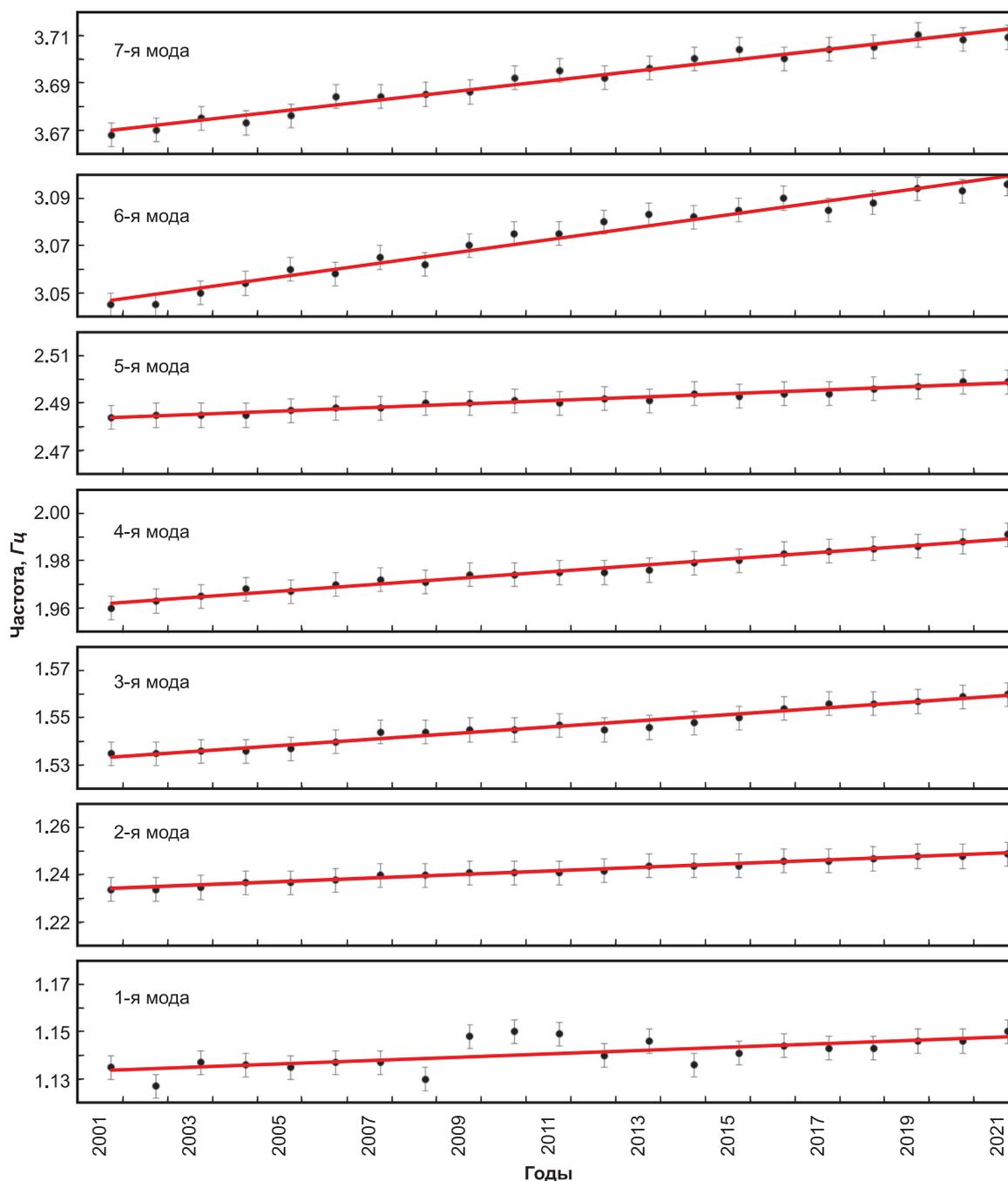


Рис. 12. Увеличение значения частот первых семи мод собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при уровне воды в водохранилище 535 м за 20-летний период наблюдений в результате применения разработанной методики

от собственных колебаний объектов, регистрируемых станциями сейсмологической сети на расстоянии в несколько километров.

Преимущество разработанной методики по сравнению с известными решениями заключается в возможности регулярного определения частот собственных колебаний различных важных объектов (плотины ГЭС, мосты, гражданские здания и др.), не оснащённых сейсмометри-

ческой аппаратурой, как в течение длительного времени, измеряемого годами и десятилетиями, так и в режиме, близком к реальному времени. Методика малозатратна по сравнению с решениями, основанными на специальной регистрации колебаний непосредственно на объектах исследования. Используется представительный материал, а именно накопленные многолетние данные мониторинга в виде непрерывных

цифровых записей сейсмического шума, зарегистрированных сейсмостанциями как побочный продукт одновременно с записями колебаний от землетрясений.

Результаты исследования на примере мониторинга частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС убедительно доказывают, что эпизодическое их определение (что неизбежно при использовании дорогостоящих и затратных методик) даёт неполную информацию об изменении частот. В частности, не определяется их изменение в связи с воздействием на сооружение внешней среды, а его неучёт приводит к значительным ошибкам в контроле технического состояния сооружений.

Ограниченность применения методики в большей мере связана с малой амплитудой анализируемых сигналов (в ряде случаев на порядки ниже уровня сейсмического шума). Расстояние от исследуемых объектов до станций, где можно распознать «полезные» сигналы, составляет несколько километров (в отдельных случаях, первые десятки километров), поэтому из-за неравномерности расположения сейсмостанций и редкой сейсмологической сети в районах пониженной сейсмичности снижается количество объектов, которые могут быть исследованы.

В дальнейшем предполагается развитие методики в части как поиска более совершенных подходов к обработке данных, повышающих качество анализа малоамплитудных сигналов, так и исследования других факторов на изменение частот собственных колебаний других объектов, в окрестности которых расположены станции сейсмологической сети.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) 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» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

Александров Ю.Н., Юсупов Т.М. О причинах и длительности периода адаптации в системе «плотина-основание» Саяно-Шушенской ГЭС // Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии: Двенадцатая научно-техническая конференция. Доклады. — СПб., 2018. — С. 3–12. — URL: <https://ntk.vniig.ru/about/trudy-konferentsiy/>

Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. Производственное издание. — Красноярск: Сибирский изд. дом «Суриков», 1999. — 561 с.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Дураченко А.А., Корабельщиков Д.Г., Гладышев Е.А. Алтай и Саяны // Землетрясения России в 2020 году. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. — С. 38–44. — EDN: KZENHO

Кальная О.И., Аюнова О.Д. Особенности функционирования Шагонарского плёса Саяно-Шушенского водохранилища и его влияние на экологическое состояние окружающей среды // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 12-7. — С. 1452–1462. — EDN: TFTKEN

Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Бах А.А., Кречетов Д.В. Об изменении значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных уровнях наполнения водохранилища // Геофизические методы исследования земной коры. Материалы Всероссийской конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырёва. — Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2014. — С. 182–186. — EDN: ТТВКТV

Саранцев М.И. Определение собственных частот колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным инженерно-сейсмометрических наблюдений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. — 2017. — Т. 283. — С. 72–81. — EDN: ZRJGEN

Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Барышев В.Г., Кузьменко А.П. Способ определения физического состояния зданий и сооружений / Патент на изобретение RU 2140625 С1 от 27.10.1999. — EDN: EZZJKH

Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В. Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. — 2013. — № 7. — С. 2–7. — EDN: QYTTXX

Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. SpectrumSeism / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666241 от 11.10.2021. — EDN: JKKTEX

Antonovskaya G.N., Kapustian N.K., Danilov A.V., Moshkunov A.I., Moshkunov K.A. New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring // Journal of Seismology. — 2017. — V. 21 (5). — P. 1039–1053. DOI: 10.1007/s10950-017-9650-8

Cai Y., Zhang K., Ye Z., Liu C., Lu K., Wang L. Influence of temperature on the natural vibration characteristics of simply supported reinforced concrete beam // Sensors. — 2021. — V. 21 (12). — 4242. DOI: 10.3390/s21124242

- Egorov A.Y., Kostylev V.S., Sarantsev M.I.* Determining the natural frequencies of the dam at the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant based on data from a seismometer system and computations // *Power Technology and Engineering*. – 2017. – V. 50, N 5. – P. 506–510. DOI: 10.1007/s10749-017-0740-0. – EDN: XNKTKK
- Emanov A.F., Seleznev V.S., Bakh A.A., Gritsenko S.A., Danilov I.A., Kuzmenko A.P., Saburov V.S., Tatkov G.I.* Standing waves in engineering seismology // *Russian Geology and Geophysics*. – 2002. – V. 43, N 2. – P. 181–196. – EDN: TNSYOL
- Hsu T.Y., Valentino A., Liseikin A., Krechetov D., Seleznev V., Chen C.C., Wang R.Z., Lin T.K., Chang K.C.* Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects // *Measurement Science and Technology*. – 2020. – V. 31 (1). – 015801. DOI: 10.1088/1361-6501/ab393c
- Liseikin A.V., Seleznev V.S., Adilov Z.A.* Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam // *Magazine of Civil Engineering*. – 2020. – V. 4 (96). – P. 15–20. DOI: 10.18720/MCE.96.2
- Loh C.H., Wu T.C.* System identification of Fei-Tsui arch dam from forced vibration and seismic response data // *Journal of Earthquake Engineering*. – 2000. – V. 4 (4). – P. 511–537. DOI: 10.1080/13632460009350381
- Mendes P., Oliveira C.C., Almeida G.J., Oliveira S.* Development of a monitoring system to Cabril dam with operational modal analysis // *The Proceedings of the 2nd Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07)*. – Porto, Portugal, 2007. – P. 1015–1023.
- Nguyen V.H., Mahowald J., Schommer S., Maas S., Zuerbes A.* A Study of Temperature and Aging Effects on Eigenfrequencies of Concrete Bridges for Health Monitoring // *Engineering*. – 2017. – V. 9. – P. 396–411. DOI: 10.4236/eng.2017.95023
- Pereira S., Magalhães F., Gomes J.P., Cunha Á., Lemos J.V.* Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir // *Engineering Structures*. – 2018. – V. 174 (1). – P. 548–560. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.076
- Vulfovich N.A., Potekhin L.P.* Development of unrecoverable displacements of the dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant while in use under design load parameters (1990–2016) // *Power Technology and Engineering*. – 2018. – V. 51, N 5. – P. 525–531. DOI: 10.1007/s10749-018-0867-7. – EDN: XXQUJF
- Weng J.H., Loh C.H.* Structural health monitoring of arch dam from dynamic measurements // *12th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments; and Fourth NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration*. – Honolulu, Hawaii, 2010. – P. 2518–2534. DOI: 10.1061/41096(366)235

Сведения об авторах

Лисейкин Алексей Владимирович, канд. геол.-мин. наук, директор Сейсмологического филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: avl@gs.nsc.ru

Селезнев Виктор Сергеевич, доктор геол.-мин. наук, гл. науч. сотр. СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: svsv0428@mail.ru

Еманов Александр Федорович, доктор техн. наук, директор Алтае-Саянского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (АСФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: emanov@gs.nsc.ru

Кречетов Дмитрий Владимирович, науч. сотр. СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: krechet1@bk.ru

Identification of natural oscillation frequencies of constructions from low-amplitude seismic signals (on the example of the Sayano-Shushenskaya HPP dam according to the monitoring data of 2001–2021)

© 2023 A.V. Liseikin¹, V.S. Seleznev¹, A.F. Emanov², D.V. Krechetov¹

¹SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia; ²ASB GS RAS, Novosibirsk, Russia

Received March 14, 2023

Abstract Based on the spectral analysis of low-amplitude seismic signals records (continuous monitoring data for 2001–2021) from one of the stations of the seismological network located at a distance of 4.4 km from the Sayano-Shushenskaya HPP, a method for determining the daily values of natural oscillation frequencies of constructions has been developed (the frequencies of the first seven modes are identified with an error no more than 0.01 Hz). The results of processing and analysis of unique data indicate a continuous and non-slowing increase in the values of the natural oscillation frequencies of the dam in the range of 0.02–0.05 Hz during the observation period. This is explained either by silting up the bottom of the reservoir in the area adjacent to the dam, or by adapting the dam and its base with subsequent increase in mechanical rigidity of the construction. At the same time, the intervals are analyzed at which the influence of seasonal environmental influences on the construction is insignificant (summer-autumn period, the water level in the reservoir is close to the maximum). The developed method of identification of natural oscillation frequencies of constructions from low-amplitude seismic signals is intended to monitor their technical condition, in order to prevent the risks of destruction of dams, industrial structures, infrastructure facilities and civil buildings with a high degree of reliability and is economically profitable in comparison with known solutions.

Keywords Method of identification of natural oscillation frequencies, low-amplitude seismic signals, control of technical condition of constructions.

For citation Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., Emanov, A.F., & Krechetov, D.V. (2023). [Identification of natural oscillation frequencies of constructions from low-amplitude seismic signals (on the example of the Sayano-Shushenskaya HPP dam according to the monitoring data of 2001–2021)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(2), 32–50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.03>. EDN: AAVYDU

References

- Alexandrov, Yu.N., & Yusupov, T.M. (2018). [On the causes and duration of the adaptation period in the “dam-foundation” system of the Sayano-Shushenskaya HPP]. In *Gidroenergetika. Gidrotekhnika. Novye razrabotki i tekhnologii: Dvenadtsataia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Doklady* [Hydropower. Hydraulic engineering. New developments and technologies. Report XII scientific and technical conference] (pp. 3–12). Saint Petersburg, Russia. Retrieved from <https://ntk.vniig.ru/about/trudy-konferentsiy/> (In Russ.).
- Antonovskaya, G.N., Kapustian, N.K., Danilov, A.V., Moshkunov, A.I., & Moshkunov, K.A. (2017). New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring. *Journal of Seismology*, 21(5), 1039–1053. DOI: [10.1007/s10950-017-9650-8](https://doi.org/10.1007/s10950-017-9650-8)
- Bryzgalov, V.I. (1999). *Iz opyta sozdaniia i osvoeniia Krasnoiarskoi i Saiano-Shushenskoii gidroelektrostantsii. Proizvodstvennoe izdanie* [From the experience of creating and developing the Krasnoyarsk and Sayano-Shushenskaya hydroelectric power stations. Production Edition]. Krasnoyarsk, Russia: Siberian Publishing house “Surikov”, 561 p. (In Russ.).
- Cai, Y., Zhang, K., Ye, Z., Liu, C., Lu, K., & Wang, L. (2021). Influence of temperature on the natural vibration characteristics of simply supported reinforced concrete beam. *Sensors*, 21, 4242. DOI: [10.3390/s21124242](https://doi.org/10.3390/s21124242)
- Egorov, A.Y., Kostylev, V.S., & Sarantsev, M.I. (2017). Determining the natural frequencies of the dam at the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant based on data from a seismometer system and computations. *Power Technology and Engineering*, 50(5), 506–510. DOI: [10.1007/s10749-017-0740-0](https://doi.org/10.1007/s10749-017-0740-0). EDN: XNKTKK

- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V., Shevkunova, E.V., Podkorytova, V.G., Durachenko, A.A., Korabel'shchikov, D.G., & Gladyshev, E.A. (2022). [Altai and Sayans]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia in 2020] (pp. 38-44). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: KZEHXO
- Emanov, A.F., Seleznev, V.S., Bakh, A.A., Gritsenko, S.A., Danilov, I.A., Kuzmenko, A.P., Saburov, V.S., & Tatkov, G.I. (2002). Standing waves in engineering seismology. *Russian Geology and Geophysics*, 43(2), 181-196. EDN: TNSYOL
- Hsu, T.Y., Valentino, A., Liseikin, A., Krechetov, D., Seleznev, V., Chen, C.C., Wang, R.Z., Lin, T.K., & Chang, K.C. (2020). Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects. *Measurement Science and Technology*, 31(1), 015801. DOI: 10.1088/1361-6501/ab393c
- Kalnaya, O.I., & Ayunova, O.D. (2014). [Functioning features of the Shagonar pool of the Sayano-Shushensky water reservoir and its impact on the environmental state]. *Fundamental'nye issledovaniia* [Basic Research], 12(7), 1452-1462. (In Russ.). EDN: TFTKEH
- Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., & Adilov, Z.A. (2020). Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam. *Magazine of Civil Engineering*, 4(96), 15-20. DOI: 10.18720/MCE.96.2
- Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., Bakh, A.A., & Krechetov, D.V. (2014). [On the change in the values of natural frequencies of the dam of the Sayano-Shushenskaya HPP at different levels of filling the reservoir]. In *Geofizicheskie metody issledovaniia zemnoi kory. Materialy Vserossiiskoi konferentsii, posviashchennoi 100-letiiu so dnia rozhdeniia akademika N.N. Puzyreva* [Processing of the conference "Geophysical methods for studying the Earth's crust"] (pp. 182-186). Novosibirsk, Russia: IPPG SB RAS Publ. (In Russ.). EDN: TTBKTV
- Loh, C.H., & Wu, T.C. (2000). System identification of Fei-Tsui arch dam from forced vibration and seismic response data. *Journal of Earthquake Engineering*, 4(4), 511-537. DOI: 10.1080/13632460009350381
- Mendes, P., Oliveira Costa, C., Almeida Garrett, J., & Oliveira, S. (2007). Development of monitoring system to Cabril dam with operational modal analysis. In *The Proceedings of the 2nd Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07)* (pp. 1015-1023). Porto, Portugal.
- Nguyen, V.H., Mahowald, J., Schommer, S., Maas, S., & Zuerbes, A. (2017). A Study of Temperature and Aging Effects on Eigenfrequencies of Concrete Bridges for Health Monitoring. *Engineering*, 9, 396-411. DOI: 10.4236/eng.2017.95023
- Pereira, S., Magalhães, F., Gomes, J.P., Cunha, Á., & Lemos, J.V. (2018). Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir. *Engineering Structures*, 174(1), 548-560. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.076
- Sarantsev, M.I. (2017). [Determination of natural vibration frequencies of the Sayano-Shushenskaya HPP dam according to engineering seismometric observations]. *Izvestiia Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva* [News of Vedeneev VNIIG], 283, 72-81. (In Russ.). EDN: ZRJGEN
- Seleznev, V.S., Emanov, A.F., Baryshev, V.G., & Kuz'menko, A.P. (1999). [Method for determining the physical condition of buildings and structures]. Patent RF for invention, No. 2140625. (In Russ.). EDN: EZZJKH
- Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., Al'zhanov, R.Sh., & Gromyko, P.V. (2013). [Influence of operation of hydraulic units on natural oscillations of the Sayano-Shushenskaya HPP dam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering], 7, 2-7. (In Russ.). EDN: QYTTXX
- Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., Sevost'ianov, D.B., & Bryksin, A.A. [SpectrumSeism]. Certificate of state registration of the computer program, No. 2021666241. (In Russ.).
- Vul'fovich, N.A., & Potekhin, L.P. (2018). Development of unrecoverable displacements of the dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant while in use under design load parameters (1990–2016). *Power Technology and Engineering*, 51(5), 525-531. DOI: 10.1007/s10749-018-0867-7. EDN: XXQUJF
- Weng, J.H., & Loh, C.H. (2010). Structural health monitoring of arch dam from dynamic measurements. In *12th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments; and Fourth NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration* (pp. 2518-2534). DOI: 10.1061/41096(366)235

Information about authors

Liseikin Aleksei Vladimirovich, PhD, Director of the Seismological Branch of the Geophysical Survey of Russian Academy of Science (SEB GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: avl@gs.nsc.ru

Seleznev Viktor Sergeevich, Dr., Chief Researcher of SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: sv0428@mail.ru

Emanov Alexander Fedorovich, Dr., Director of the Altai-Sayan Branch of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (ASB GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: emanov@gs.nsc.ru

Krechetov Dmitry Vladimirovich, Researcher of SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: krechet1@bk.ru