

УДК 550.348

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ ПО СОБСТВЕННЫМ КОЛЕБАНИЯМ (по данным мониторинга на Кольванском месторождении антрацита, Новосибирская область)

А.В. Лисейкин<sup>1</sup>, В.С. Селезнев<sup>1</sup>, А.Ф. Еманов<sup>2</sup>, В.М. Соловьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup>АСФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

По результатам анализа записей с 2017 по 2021 г. сейсмостанции «Харино» сейсмологической сети станций Алтае-Саянского региона и снимков со спутников с 2002 по 2019 г. установлена причина оползня 18 июля 2020 г. на Елбашинском отвале Кольванского месторождения антрацита Новосибирской области. По собственным колебаниям отвала показано, как определять степень его устойчивости и таким образом предупреждать аварийные ситуации на месторождениях твердых полезных ископаемых.

*Оползень, собственные колебания, степень устойчивости, отвалы месторождений*

## ESTIMATING COAL MINE DUMP STABILITY FROM ITS NATURAL OSCILLATIONS (Based on Seismic Monitoring at the Kolyvan Anthracite Deposit, Novosibirsk Region)

A.V. Liseikin, V.S. Seleznev, A.F. Emanov, B.M. Solov'ev

Based on the analysis of the 2017–2021 recordings from the Kharino seismic station (the Altai-Sayan seismic stations network) and the 2002–2019 satellite imagery, the trigger of the July 18, 2020 earth-slide at Elbashinsky waste rock dump of the Kolyvan Anthracite Deposit (Novosibirsk region) has been established. The study of natural oscillations of the mine waste dump allowed estimating its stability and thus contributing to environmental and industrial safety in surface mining of solid minerals.

*Earth-slide, natural oscillations, level of stability, mine waste dumps*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время естественная сейсмичность на территории России определяется по результатам сейсмологических исследований Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) и учитывается при принятии различных решений федеральными и местными органами управления, опираясь на карты сейсмического районирования. Последние годы происходит значительное увеличение роли техногенной составляющей при наблюдениях за сейсмическими процессами в районах угольных разрезов, но кто должен следить за этими явлениями, какие системы наблюдений необходимо при этом использовать, кто и какие действия должен предпринимать, получив данные по техногенной сейсмичности, на сегодня не определено.

На угольных разрезах приборами сейсмологической сети станций регистрируются два типа сейсмических колебаний техногенного характера. Первый — это импульсные, или кратковременные, колебания земной поверхности, возникающие при разработке крупных карьеров, весьма схожие с естественным землетрясением. Второй — регистрируемые сейсмостанциями длительные и в какой-то мере устойчивые во времени малоамплитудные колебания, как правило, характеризующиеся определенной частотой (или полосой частот).

Если первый тип сейсмических колебаний как результат техногенного воздействия изучается (хотя и недостаточно) в Российской Федерации преимущественно по материалам сети временных сейсмологических станций (например, землетрясение с  $M > 6$  в результате техногенного воздействия на Бачатском угольном разрезе [Еманов и др., 2020]), то второй тип исследован весьма слабо и для его изучения не разработано специальных систем наблюдения. Обычно лишь после аварии на объекте выясняются ее причины, оцениваются затраты на ее ликвидацию [Seleznev et al., 2014].

Результаты длительных сейсмических исследований [Seleznev et al., 2014; Hsu et al., 2020] показывают, что техногенные шумы, зарегистрированные станциями, расположенными даже на значительном



**Рис. 1.** Стоп-кадры видеосъемки Елбашинского отвала Колыванского угольного разреза через несколько дней после оползня [<https://youtu.be/KhXGpzuzPCU>].

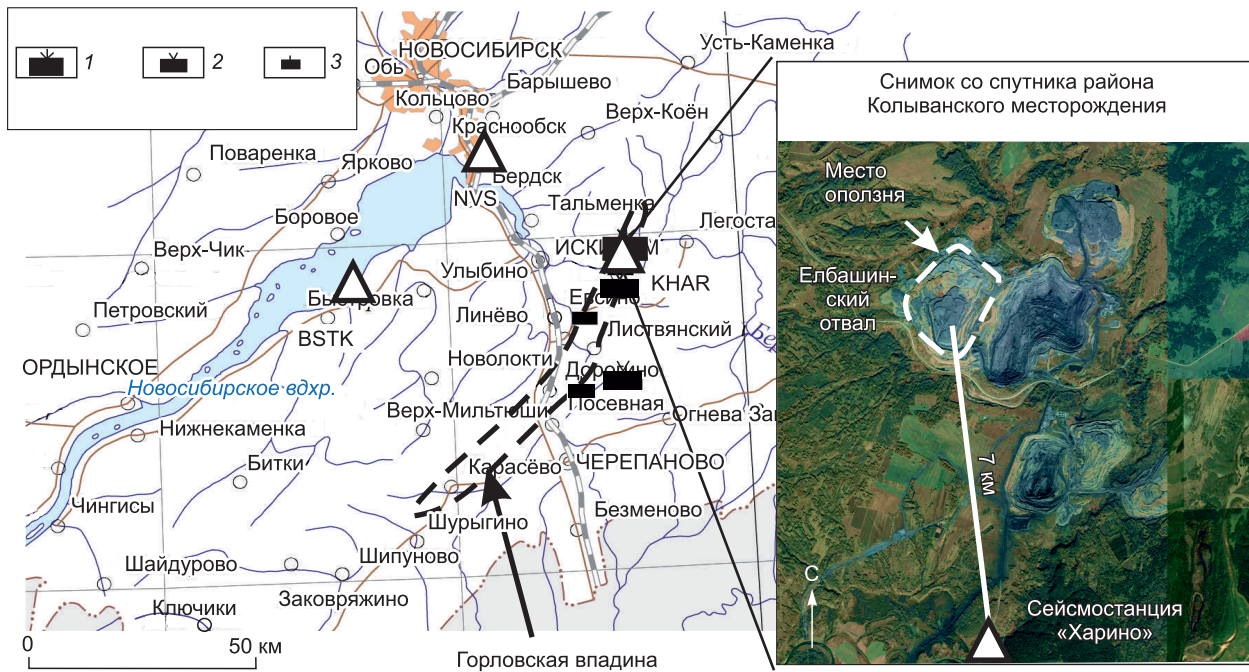
расстоянии от источника колебаний (техногенных сооружений), содержат богатую информацию об изменении колебаний сооружений во времени, анализ которых дает сведения о техническом состоянии сооружений и работающих агрегатов (например ГЭС). Как правило, большинство техногенных шумов удаленными сейсмостанциями регистрируется в виде малоамплитудных, длительных по времени колебаний, которые изменяются по известным законам как по интенсивности, так и по частоте. Записи таких сигналов накапливаются и хранятся.

Из публикации [Интервью..., 2020] известно, что 18 июля 2020 г., примерно в 21:15 местного времени, на северо-западном склоне Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита произошел оползень с предварительно оцененным объемом около 10 % от массы отвала, причем деформация отвала сопровождалась мощным селевым потоком. Это хорошо видно на видеозаписях, сделанных через несколько дней после происшествия (рис. 1) [<https://youtu.be/KhXGpzuzPCU>]. Создана комиссия по расследованию причины деформации, которая на сегодня не выяснена.

Специалистами Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН по результатам анализа представительного материала постоянной сейсмологической сети из более чем 50 сейсмостанций оценивается сейсмичность в Алтае-Саянском регионе и прилегающих территориях как естественного, так и техногенного характера. Одна из станций, «Харино» (международный код KHAR, аппаратура CMG-3ESPC), находится в семи километрах южнее Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита (рис. 2). Спектрально-временной анализ записей этой станции (с начала 2017 г.), совместно с анализом снимков со спутника, доступных с 2002 по 2019 г., позволил разобраться в причине возникновения оползня.

#### **ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И СПОСОБЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

На снимке естественного ландшафта со спутника 2002 г. (рис. 3) видно, что на месте будущего отвала в направлении на северо-восток прослеживается сезонный (весенне-осенний) водоток. К северо-западу от него виден еще один водоток, отделенный от первого водоразделом высотой 209—223 м над ур. м. На снимках 2013 и 2015 гг. видно, что отвал препятствует естественному стоку воды, и его западная часть обводняется. Видно также, что в мае 2015 г. на месте временного водотока формируется



**Рис. 2. Схема сейсмологических наблюдений на карте угольных месторождений Новосибирской области [Карта..., 2020].**

Размер месторождения: 1 — крупное, 2 — среднее, 3 — малое. BSTK, NVS, KHAR — сейсмостанции.

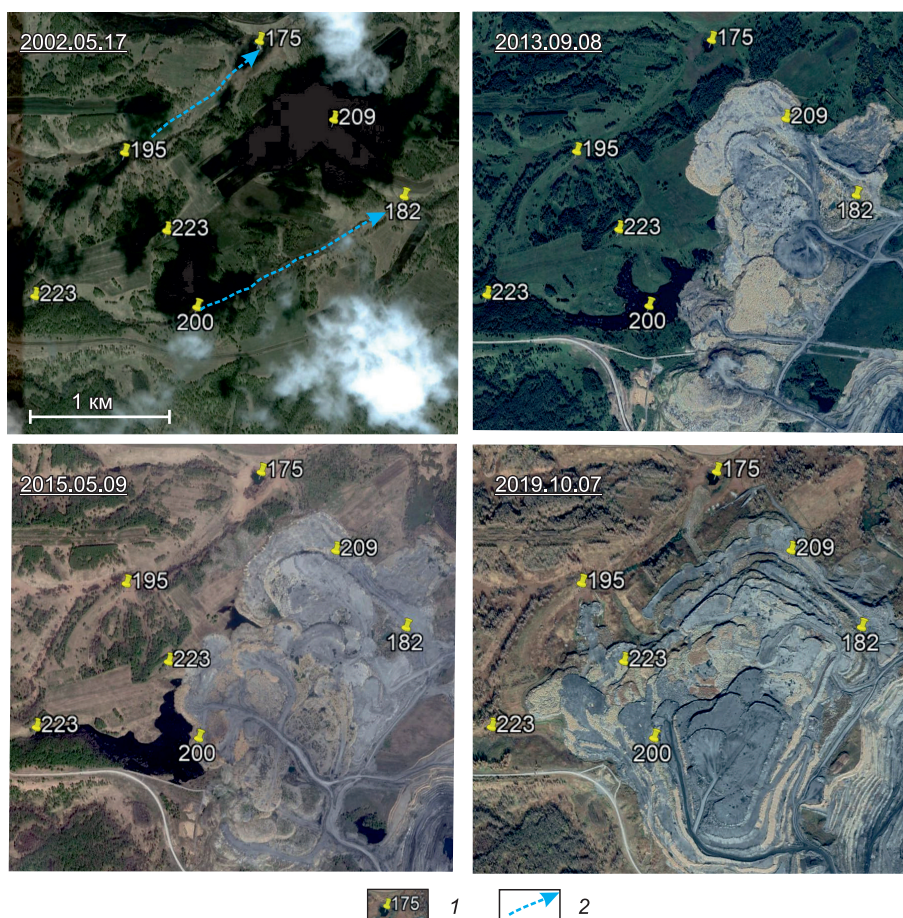
запруда длиной около 1 км, уровень воды в которой достигает, судя по снимку, около 220 м над ур. м., что уже превышает среднюю высоту водораздела. На снимке 2019 г. видно, что временный водоток полностью засыпан отвалами горных пород, из чего следует, что к 2020 г. обводненная часть отвала могла составлять первые десятки метров по высоте и около квадратного километра по площади. Из анализа снимков следует вывод, что прежде чем формировать отвал необходимо исследовать ландшафт предполагаемой площадки.

В такой обстановке, чтобы начался оползень, достаточно лишь толчка. Однако на трехкомпонентных записях сейсмостанции «Харино» упругих колебаний, которые могли бы послужить таким толчком для деформации отвала, не зарегистрировано ни до, ни во время оползня, ни после его (рис. 4).

Многолетний опыт авторов статьи по анализу записей сейсмического шума на сейсмологической сети станций показывает, что в спектрах последних содержится много полезной информации, характеризующей состояние источника колебаний, находящегося на некотором удалении от сейсмостанции. Например, исследованиями [Seleznev et al., 2014; Hsu et al., 2020] показано, что в сейсмическом шуме, зарегистрированном на расстоянии более чем 4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, содержатся сигналы, источником которых являются как работающие гидроагрегаты, так и плотина, колеблющаяся на собственных частотах. Это дает основание предполагать, что и в сейсмическом шуме станции «Харино», оснащенной высокочувствительной сейсмологической аппаратурой, содержатся малоамплитудные упругие колебания, связанные с колебаниями Елбашинского отвала. Чтобы определить эту связь, сначала на качественном уровне выполняется анализ изменений во времени амплитудно-частотных характеристик зарегистрированного сейсмического шума. Для этого строятся спектрограммы записей сейсмостанции (рис. 5), по вертикальной оси которых указывается время, по горизонтальной — частота; третье измерение — амплитуда, представленная цветовой шкалой на определенной паре частота—время.

На спектрограммах (см. рис. 5) обращают на себя внимание сигналы с частотой около 0.6 Гц, которые прослеживаются длительное время и непрерывно на трех компонентах записи и прерываются одновременно с оползнем. Это указывает на то, что они связаны с колебаниями отвала, физические параметры которого изменились после деформации. Известно, что в любом замкнутом объеме при распространении микросейсмических колебаний формируются стоячие волны с собственными частотами. По методике оценки значений частот М. Бата [1980], частота 0.6 Гц может быть собственной частотой Елбашинского отвала. Так, для отвала, имеющего горизонтальные размеры от 1.2 до 1.8 км (значения по снимку со спутника 2019 г., см. рис. 3), при скорости продольных волн в горных породах 1400—1750 м/с (по данным исследования [Жанарейкин и др., 2022]), первая собственная частота колебаний в горизон-





**Рис. 3.** Спутниковые снимки Елбашинского отвала Колыванского угольного разреза (Google Earth Pro).

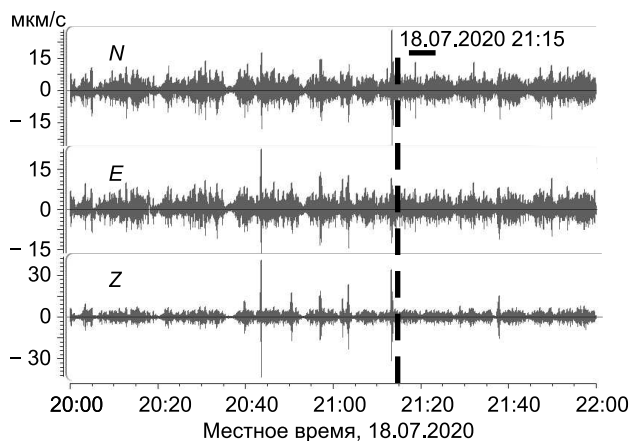
1 — отметки высот нетронутой земной поверхности (м над ур. м.); 2 — направления сезонных (весенне-осенних) водотоков.

тальной плоскости, оцененная по формуле  $f = V/2L$  (для объектов со свободными краями) составляет от 0.4 до 0.7 Гц; наблюдаемые на спектрограммах сигналы с частотой 0.6 Гц не противоречат этой оценке. Таким образом, указанные сигналы интерпретируются как отклик от продольных колебаний отвала в горизонтальной плоскости, формирующих стоячую волну.

Возможность регистрации сейсмическими станциями, расположенными в нескольких километрах от крупных технических сооружений (например, плотины ГЭС), сигналов, источником которых является само сооружение, колеблющееся на собственных частотах, подтверждается результатами предыдущих исследований [Seleznev et al., 2014; Hsu et al., 2020]. В качестве примера приводятся колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС на собственных частотах по данным дистанционного мониторинга (рис. 6). На усредненных спектрах (первоначально рассчитанных амплитудных спектрах от 200-секундных фрагментов односуточной записи сейсмического шума с последующим усреднением) видно, что локальные максимумы спектров записей колебаний верхней части плотины, отражающие собственные частоты сооружения, прослеживаются и на усредненном спектре одновременной записи сеймостанции «Черемушки», расположенной в 4.4 км от ГЭС (см. рис. 6, б). Следовательно, по результатам расчета усредненных спектров в разное время можно определить изменение частот собственных колебаний объекта, используя записи с удаленной сейсмической станции (см. рис. 6, в).

На усредненных спектрах (см. рис. 6, б) также видно, что амплитуды зарегистрированных сеймостанцией «Черемушки» колебаний, источником которых является удаленная на 4.4 км от нее плотина Саяно-Шушенской ГЭС, составляют 10—30 нм/с, что на два и более порядка ниже амплитуд упругих колебаний, зарегистрированных непосредственно в плотине. Поэтому для выделения таких слабых сигналов необходимы современные способы обработки данных для повышения соотношения сигнал/помеха. В Сейсмологическом филиале ФИЦ ЕГС РАН разработано программное обеспечение [Селезнев и др., 2021] для расчета амплитудно-частотных характеристик сейсмических записей и их изменений с



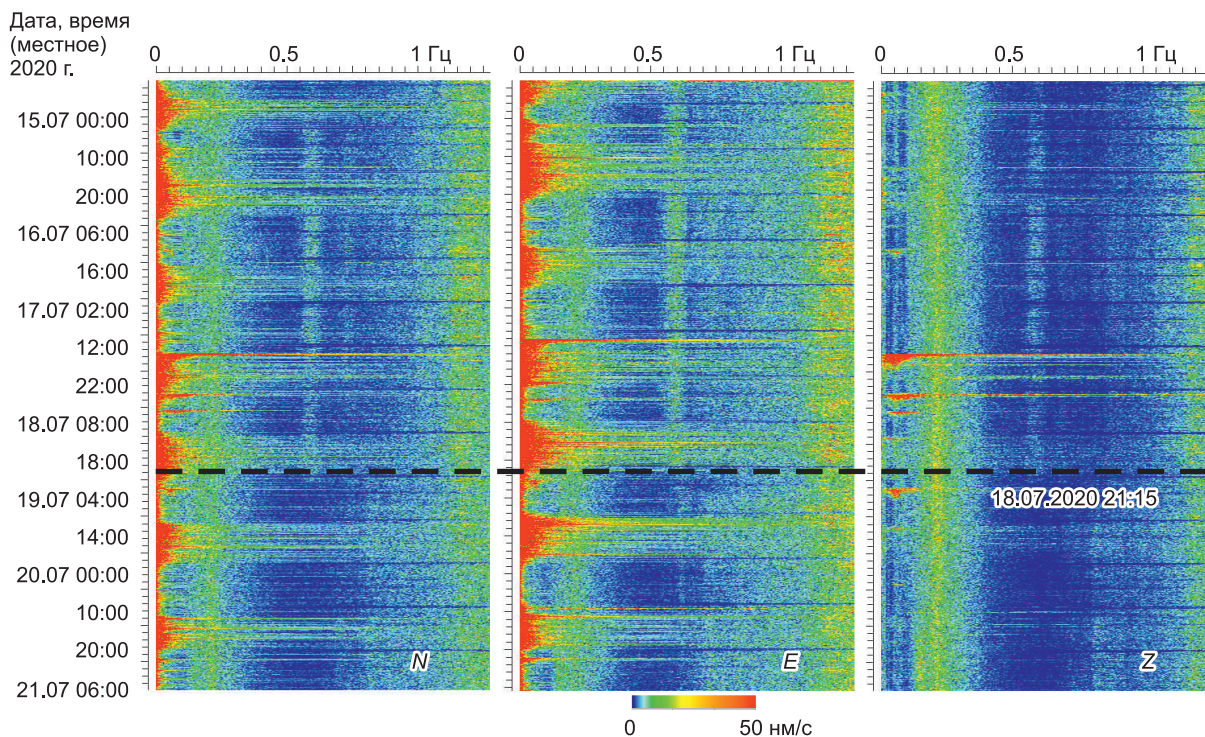


**Рис. 4. Исходная запись упругих колебаний с сейсмостанции «Харино» перед и после деформации Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита.**

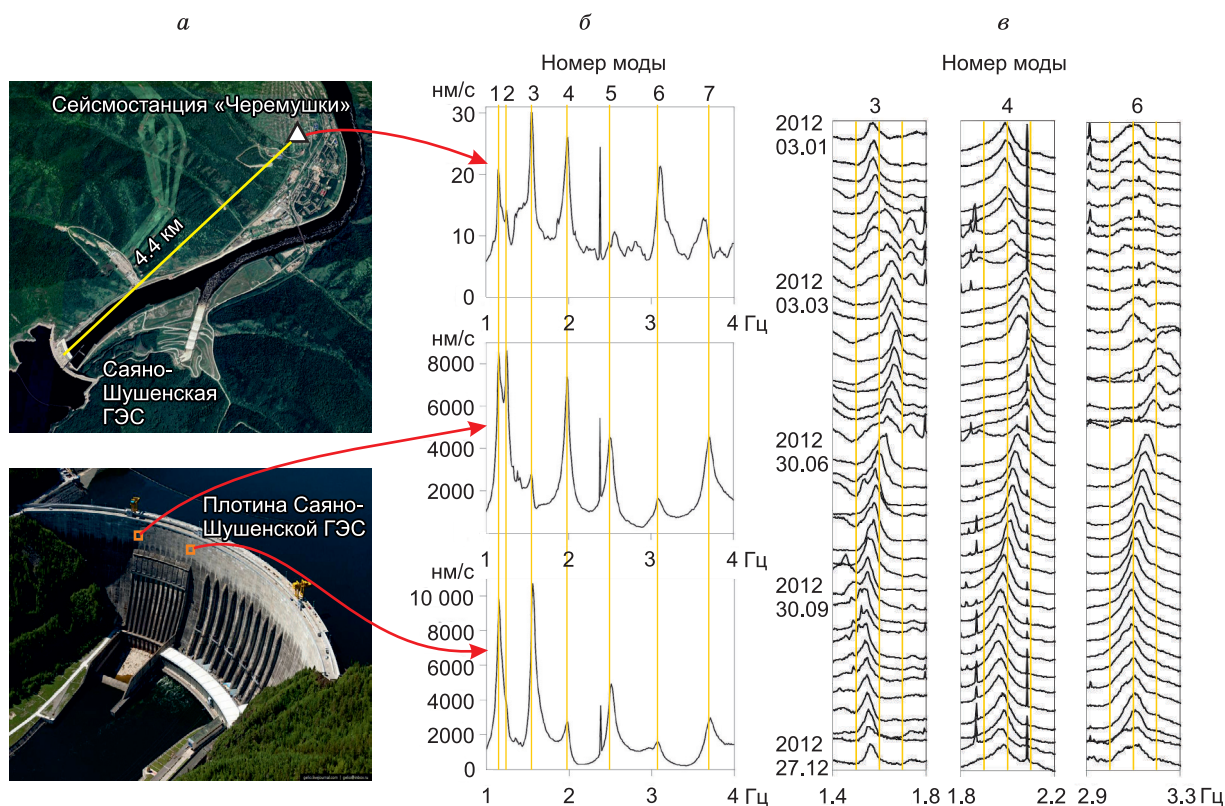
течением времени. При этом одна из функций заложена для расчета усредненных амплитудных спектров в выбранном частотно-временном окне. В алгоритм их вычисления входит расчет наборов амплитудных спектров для заданных временных интервалов, на которые разделяется сейсмическая запись, с их последующим усреднением. Это позволяет по длинным во времени записям выделять из сейсмического шума техногенного характера

полезные сигналы, имеющие квазистабильные спектры, по амплитуде на порядки ниже уровня помех. Например, для уверенного выделения описанных выше сигналов (см. рис. 6, в) необходимо усреднять записи длительностью около суток.

На фрагментах усредненных спектров (рис. 7), рассчитанных по сейсмическим записям с трех станций длительностью в 5 сут и охватывающих интервалы времен до и после оползня на Елбашинском отвале, видно, что после описываемого события 18.07.2020 г. в 21:15 выделенные колебания с частотой около 0.6 Гц исчезают, что позволяет относить их к собственным колебаниям отвала. Зарегистрированные на удаленных станциях сигналы объясняются распространением совокупности сейсмических волн (как поверхностных, так и объемных разнополяризованных волн) от источника колебаний, которые интерферируют в точке регистрации. Разделить волны разного типа по амплитудным спектрам невозможно, однако анализ амплитуд колебаний на различных компонентах позволяет сделать вывод, что преобладающая часть энергии колебаний переносится от источника в виде горизонтальных колебаний, поляризованных перпендикулярно направлению на источник. Это видно на рисунке: на сейсмостанции «Харино» (KHAR), расположенной с юга от отвала, наибольшая энергия колебаний зарегистрирована на перпендикулярной (*E*) компоненте, а на сейсмостанциях NVS и BSTK, расположенных с северо-запада и юго-запада соответственно, зарегистрированные амплитуды колебаний на горизонтальных *N*- и *E*-компонентах имеют близкие значения. Таким образом, описанный способ анализа амплитуд колеба-



**Рис. 5. Спектрограммы записей сейсмостанции «Харино».**

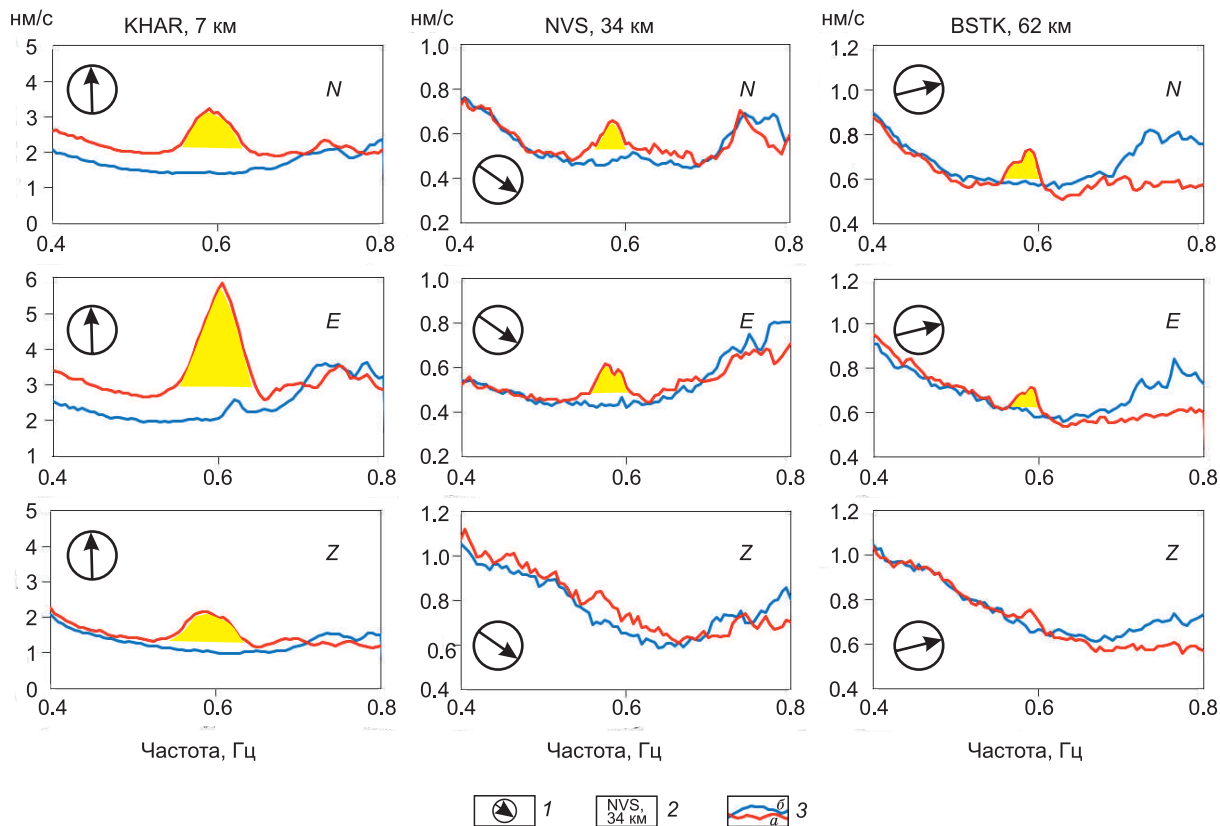


**Рис. 6.** Схемы расположения сейсмостанции «Черемушки» и временных сейсмических регистраторов в плотине Саяно-Шушенской ГЭС на фотографиях (а); усредненные спектры одновременных записей (б); усредненные спектры односуточных записей сейсмостанцией «Черемушки» (по данным АСФ ФИЦ ЕГС РАН), показывающие изменения частот собственных колебаний (в).

ний по спектрам записей сейсмического шума на сейсмостанциях сейсмологической сети может быть использован при оценке направления на источник колебаний.

Из анализа зарегистрированных на сейсмостанции «Харино» сейсмограмм за 5 сут до описываемого события 18 июля 2020 г. следует, что колебания с частотой около 0.6 Гц — это собственные колебания Елбашинского отвала Кольванского месторождения антрацита на собственной частоте. На снимках со спутника (см. рис. 3) видно, что отвал формируется не менее восьми лет (с 2013 по 2020 г.), а значит, его собственные колебания регистрируются длительное время. При анализе архивных записей более чем за четыре с половиной года — с 01.01.2017 по 31.07.2021 г. на сейсмограммах (рис. 8) видны изменения фрагментов (в интервале частот 0.4—1.0 Гц) усредненных спектров десяти-, пяти- и односуточных сейсмических записей, а на графиках (рис. 9) — изменение значений частот колебаний отвала по усредненным амплитудным спектрам. Здесь и далее длина записи для вычисления единичного спектра составляет 200 с, что определяет высокую разрешенность спектра — 0.005 Гц. Как наиболее интенсивная по амплитуде анализируется  $E$ -компонента сейсмической записи, а результат усреднения соотносится с серединой соответствующего временного интервала. На сейсмограммах периода наблюдений с 2017 по 2021 г. (см. рис. 8) видно, что лишь с конца 2018 г. и до деформации отвала в июле 2020 г. отмечаются сигналы ( $f_1$ ) с изменяющимися в пределах 0.60—0.67 Гц частотами, которые не фиксируются на записях после оползня. Также во времени отмечается плавное и монотонное уменьшение частоты колебаний (см. рис. 8, а; 9, а). Из анализа усредненных спектров пятисуточных записей и соответствующих им частот за более короткий период (см. рис. 8, б; 9, б) следует, что с начала 2020 г. и до момента оползня сигналы  $f_1$  отмечаются на частотах 0.60—0.61 Гц, затем амплитуда колебаний уменьшается в несколько раз, а частота повышается до 0.620—0.625 Гц (сигналы  $f_2$ ). После 30.08.2020 сигналы  $f_2$  на записях становятся неразличимыми на фоне помех, что указывает на значительное (более двух порядков) снижение значений их амплитуд. Для детального анализа изменения характеристик исследуемых сигналов строятся наборы усредненных спектров за односуточные интервалы записей и определяются частоты колебаний (см. рис. 8, в; 9, в). На записях видно, что примерно за 20 дней до деформации от-



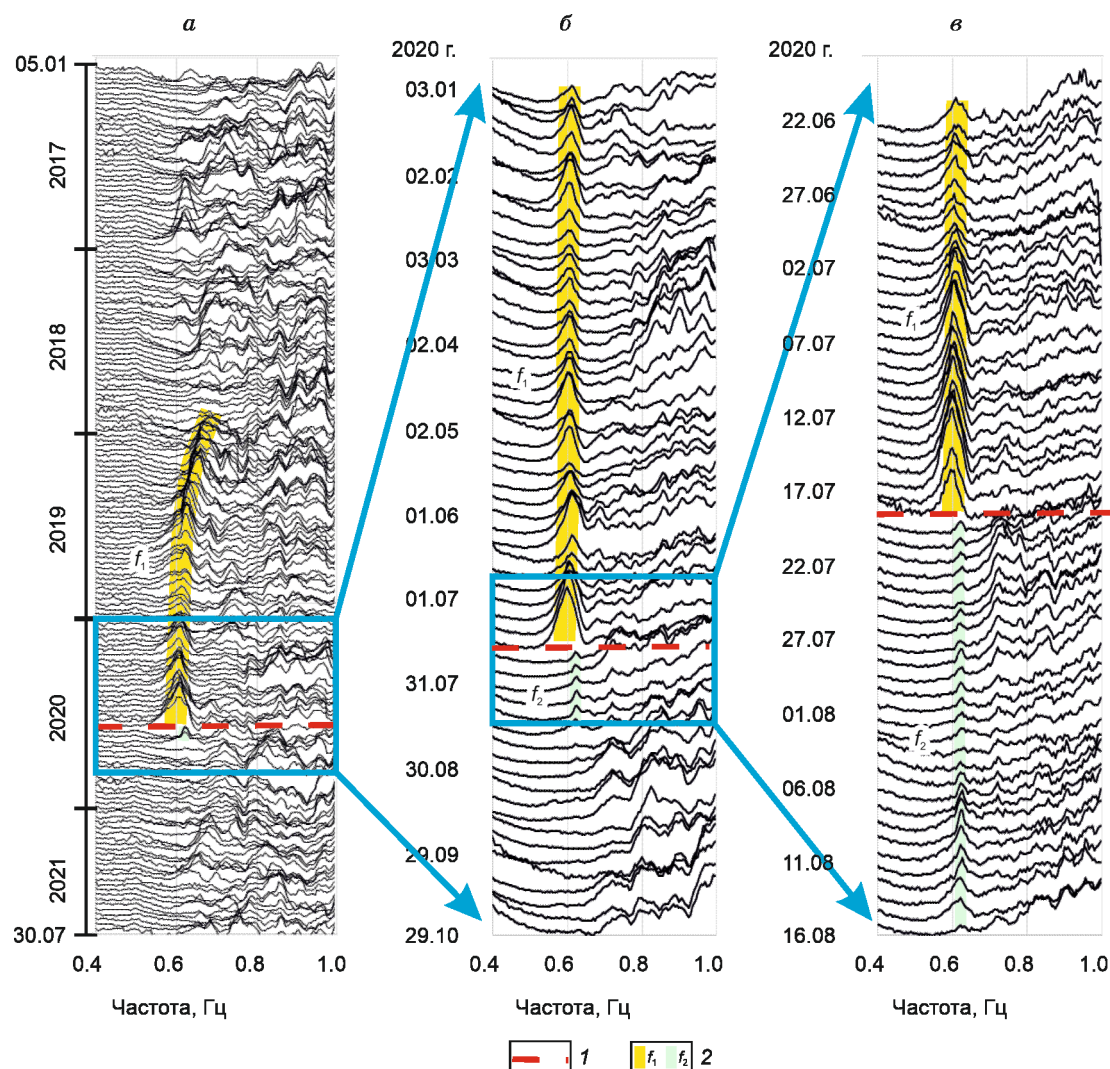


**Рис. 7. Проявление в спектрах записей сейсмостанций собственных колебаний Елбашинского отвала Кольванского месторождения антрацита на собственной частоте.**

1 — направление на месторождение; 2 — код сейсмостанции, расстояние до отвала; 3 — усредненные амплитудные спектры пятисуточных записей до (а) и после (б) события 18.07.2020, 21:15.

вала происходит постепенный рост амплитуд колебаний сигналов  $f_1$ , а за 2 дня до оползня — их снижение. После оползня амплитуда колебаний сигналов  $f_2$  примерно в 5—6 раз ниже амплитуды колебаний сигналов  $f_1$ , наблюдаемых до деформации отвала. Итак, из анализа архивных сейсмических записей следует, что собственные колебания Елбашинского отвала зарегистрированы в период с конца 2018 г. по август 2020 г., причем во времени характеристики колебаний (частота и амплитуда) менялись, что говорит об изменениях физических свойств отвала, прежде всего таких, как размеры и масса.

Процессы, происходящие на Елбашинском отвале до и после его деформации, по результатам анализа записей сейсмической станции «Харино», а также снимков со спутника и видеозаписей после происшествя объясняются следующим. На стоп-кадрах видеосъемки последствий оползня (см. рис. 2) видно, что он распространяется подобно селевому потоку на расстояние, существенно превышающее высоту отвала. Такое происходит только при его значительном обводнении. Как видно на снимках со спутника (см. рис. 3), уровень воды в образовавшейся при отсыпке отвала запруде выше основания отвала на несколько десятков метров (около 30 м, если принимать средние высоты основания отвала и запруды соответственно 190 и 220 м от уровня моря). При площади отвала более чем 2 км<sup>2</sup> объем находящейся в нем воды составит не менее 6 млн м<sup>3</sup> (при среднем водонасыщении 10 %). Обводнение отвала — предполагаемая причина его неустойчивости. Из-за насыщения водой происходит размягчение грунта в его нижней части. Как следствие, изменяются граничные условия на контакте отвала с грунтом, а сам он становится более податливым к раскачиванию под воздействием окружающих микросейсмических колебаний. В таких условиях в теле отвала формируется стоячая волна, которая выражается в многомесячных колебаниях с частотой 0.60—0.67 Гц, регистрирующихся с конца 2018 г., характеристики которых меняются как в процессе формирования отвала, так и после его деформации. Очевидно, что обводнение отвала происходит постепенно и не сразу он теряет устойчивость — это объясняет то, что с 2017 г. по конец 2018 г. описанные колебания не регистрируются. Полная картина процессов, происходящих начиная с 2019 г., следующая. Отсыпка горных пород ведет к постепенному росту массы и размеров отвала. Это выражается в монотонном уменьшении на записях частоты колеба-



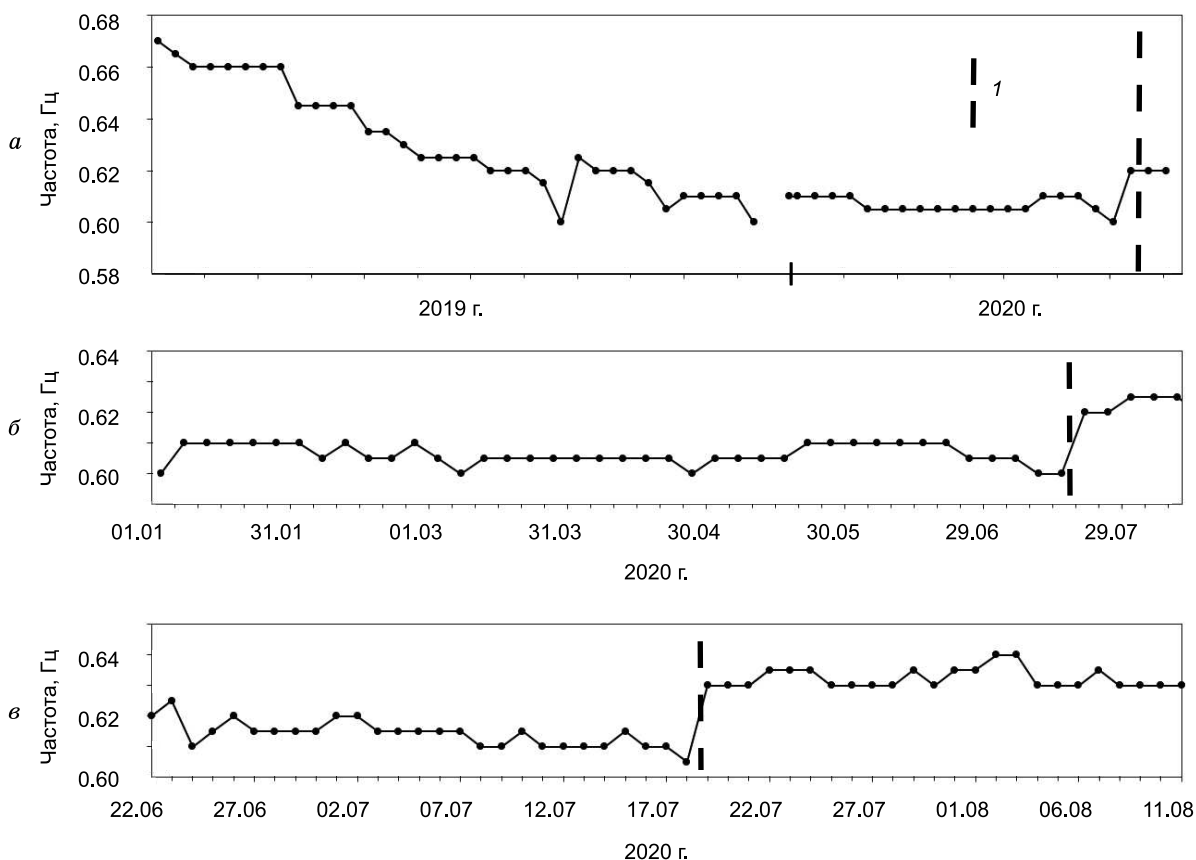
**Рис. 8.** Изменение колебаний Елбашинского отвала Кольванского месторождения антрацита по *E*-компоненте в рядах усредненных амплитудных спектров десяти- (*a*), пяти- (*б*) и односуточных (*в*) записей сейсмостанции «Харино».

1 — отметка времени оползня (18.07.2020, 21:15); 2 — выделенные сигналы от собственных колебаний отвала на собственной частоте.

ний сигналов  $f_1$  с 0.67 до 0.60—0.61 Гц. В результате оползня уменьшаются масса отвала и его геометрические размеры, как следствие, увеличивается собственная частота на величину около 3 %. В таком же процентном отношении должна уменьшиться масса отвала, если пренебречь изменениями его размеров. После деформации огромные массы воды разрушают тело отвала и вместе с породой вытекают из него. Осушение приводит к увеличению устойчивости отвала, что проявляется в резком уменьшении амплитуд собственных колебаний. Несомненно, уже после оползня, какая-то часть воды постепенно продолжает выходить из отвала. Это выражается в том, что амплитуды колебаний сигналов  $f_2$  постепенно снижаются и примерно через месяц после события не отмечаются на сейсмограммах. Результаты анализа записей сейсмостанции «Харино» в течение полутора лет после оползня (см. рис. 8, *a*) показывают, что формирующиеся в отвале собственные колебания по амплитуде уменьшились более чем на 2 порядка по сравнению с ситуацией до деформации, что говорит о высокой степени его устойчивости в указанный период времени.

Итак, из анализа записей упругих колебаний с 2017 по 2021 г. сейсмостанции «Харино» сейсмологической сети станций Алтае-Саянского региона и снимков со спутника с 2002 по 2019 г. следует, что обводнение отвала — основная причина его неустойчивости. А что же служит спусковым крючком для развития оползня? Какие явления способствуют его возникновению? Как было отмечено, в результате





**Рис. 9.** Изменение собственной частоты собственных колебаний Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита по усредненным амплитудным спектрам десяти- (*а*), пяти- (*б*) и односуточных (*в*) записей сейсмостанции «Харино».

1 — отметка времени оползня (18.07.2020, 21:15).

анализа записей сейсмологической сети станций, окружающих месторождение, не выявлено сейсмических воздействий, которые могли бы спровоцировать сход оползня. Результаты исследования говорят о том, что деформация отвала происходила по сценарию «последней капли».

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа сейсмологических записей, снимков со спутника и видеозаписей следует, что причиной неустойчивости Елбашинского отвала Колыванского угольного разреза является обводнение. Из-за насыщения водой происходит размягчение грунта в нижней части отвала, меняются граничные условия на контакте отвала с грунтом, а сам он становится более податливым к раскачиванию под воздействием окружающих микросейсмических колебаний. Это проявляется в формировании собственных колебаний отвала, отклик от которых регистрируется в виде малоамплитудных колебаний в сейсмическом шуме сейсмостанции «Харино», находящейся в 7 км от отвала. Возможно, что собственные колебания отвала спровоцировали оползень, так как сейсмических воздействий перед оползнем по материалам сейсмологической сети станций в окрестностях Колыванского месторождения антрацита не зарегистрировано. Результаты исследования позволяют теперь ставить целенаправленно задачи по анализу зарегистрированных сейсмических шумов на аналогичных объектах, выделению их собственных колебаний и по изменениям амплитудно-частотных характеристик последних прогнозировать (а значит предотвращать) разрушения, зачастую с человеческими жертвами, дорогостоящих технических сооружений, таких как отвалы угольных разрезов, плотины ГЭС, здания и сооружения крупных промышленных объектов и других подобных объектов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмо-

инфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

#### ЛИТЕРАТУРА

**Бат М.** Спектральный анализ в геофизике. Пер. с англ. М., Недра, 1980, 535 с.

**Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В.** Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с  $M_L = 6.1$ ,  $I_0 = 7$  (Кузбасс) // Российский сейсмологический журнал, 2020, т. 2, № 1, с. 48—61, doi: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>.

**Интервью** с исполнительным директором АО «Сибирский Антрацит» Сергеем Коломниковым. Электронный ресурс. <https://ksonline.ru/380333/sergej-kolomnikov-my-dejstvovali-otkryto-i-operativno> (последнее обращение 03.06.2022).

**Канарейкин Б.А., Сальников А.С., Напреев Д.В., Мосягин Е.В., Гошко Е.Ю.** Первый опыт изучения складчатой структуры угольных пластов в Горловском антрацитовом бассейне методом сейсморазведки // Интерэкспо «ГеоСибирь-2022», 2022, т. 2, № 2, с. 99—107.

**Карта** месторождений полезных ископаемых, увязанная с государственным балансом запасов РФ. Горючие ископаемые. Новосибирская область. Сибирский федеральный округ. 2020. Электронный ресурс ФГБУ «ВСЕГЕИ», <http://atlaspacket.vsegei.ru/#23927122f784997b6> (последнее обращение 11.10.2021).

**Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А.** SpectrumSeism // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666241, 11.10.2021. Заявка № 2021665611 от 11.10.2021.

**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 // Meas. Sci. Technol., 2020, v. 31 (1), p. 015801.

**Seleznev V.S., Liseikin A.V., Bryksin A.A., Gromyko P.V.** What caused the accident at the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant (SSHPP): a seismologist's point of view // Seismol. Res. Lett., 2014, v. 85 (4), p. 817—824.

<https://youtube/KhXGpzuzPCU>.