

УДК 550.348.4

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ОПОЛЗНЯ НА ОТВАЛЕ КОЛЫВАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АНТРАЦИТА (НОВОСИБИРСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2021 г. В. С. Селезнев^{1,*}, А. В. Лисейкин¹, А. Ф. Еманов², В. М. Соловьев²

Представлено академиком РАН М.И. Эповым 11.01.2021 г.

Поступило 11.01.2021 г.

После доработки 13.05.2021 г.

Принято к публикации 13.05.2021 г.

Представлены результаты анализа космических снимков и сейсмологических материалов при выяснении причин схода оползня на Елбашинском отвале Колыванского месторождения антрацита. Продемонстрированы возможности определения собственных колебаний крупных объектов по низкочастотным сейсмологическим записям и их мониторинга.

Ключевые слова: оползень, космические снимки, сейсмологические записи, амплитудные спектры, спектрограммы, собственные частоты колебаний

DOI: 10.31857/S2686739721070124

ВВЕДЕНИЕ

На Колыванском месторождении антрацита 18 июля 2020 г., примерно в 21:15 местного времени, произошел оползень с предварительно оцененным объемом около 10% от Елбашинского отвала [1]. Создана комиссия, которая занимается выяснением причин возникновения деформации.

АСФ ФИЦ ЕГС РАН занимается изучением сейсмической обстановки в Алтае-Саянском регионе и прилегающих территориях. Одна из станций сейсмологической сети (“Харино”) расположена в 9 км от Елбашинского отвала. Попробуем, используя данные космической съемки и записи сейсмической станции, разобраться в причинах, которые привели к образованию оползня. Коллектив авторов уже давно занимается проблемами дистанционного контроля процессов, приводящих к техногенным авариям [2, 3], имеет в этом направлении определенный опыт и успехи, и данная статья лишь еще один шаг в этом направлении.

На рис. 1 представлены космические снимки исследуемого района, полученные в разное время. Чтобы понять окружающую обстановку вокруг отвала, на рисунке приведены отметки высот 185, 212 и 219 м над уровнем моря. На снимке 2013 г. видно, что формирующийся отвал препятствовал естественному стоку вод, и в его северовосточной части происходило обводнение. В 2017 г. из сформировавшегося в северо-восточной части отвала озера был сооружен дренажный канал на уровне в 212 м, а в 2019 г. он находился уже на уровне 219 м. К 2020 г. обводненная часть отвала могла составлять несколько десятков метров по высоте и около квадратного километра по площади. Для того чтобы оползень начал движение, нужен был лишь толчок. Анализ сейсмологических записей, полученных в этом районе, показал, что никаких мощных импульсных воздействий (взрыв, землетрясение) вблизи не было. Вероятно, спусковым крючком для начала движения послужили мощные низкочастотные техногенные колебания, хорошо регистрируемые здесь.

СХЕМА НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 2 представлен фрагмент карты месторождений горючих полезных ископаемых Новосибирской области. Колыванское месторождение, на котором произошел оползень, расположено в северной части Горловской впадины. В 9 км на юго-юго-запад от Елбашинского отвала установлена широкополосная сейсмическая

¹ Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, Новосибирск, Россия

² Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, Новосибирск, Россия

*e-mail: sel@gs.nsc.ru

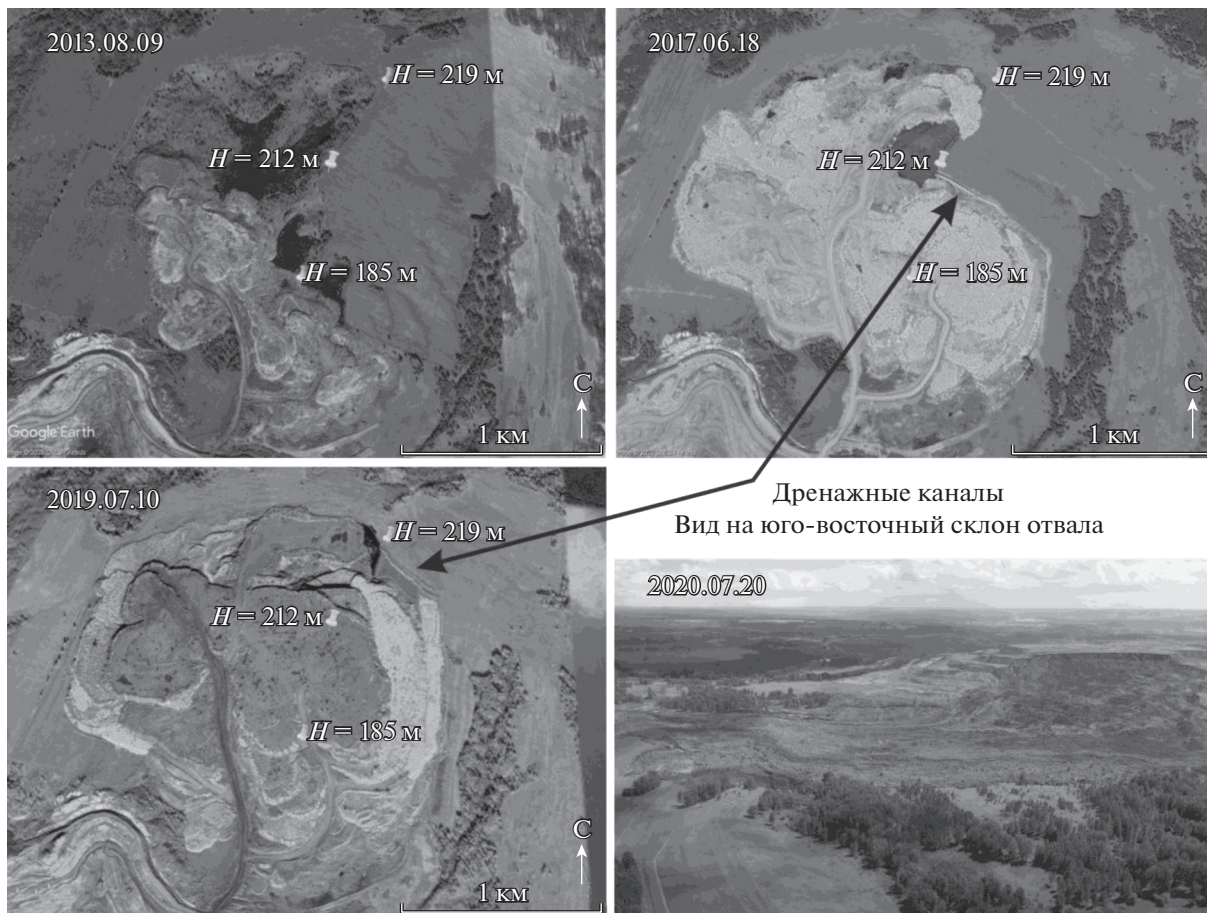


Рис. 1. Космические снимки Елбашинского отвала и фотографии оползня.

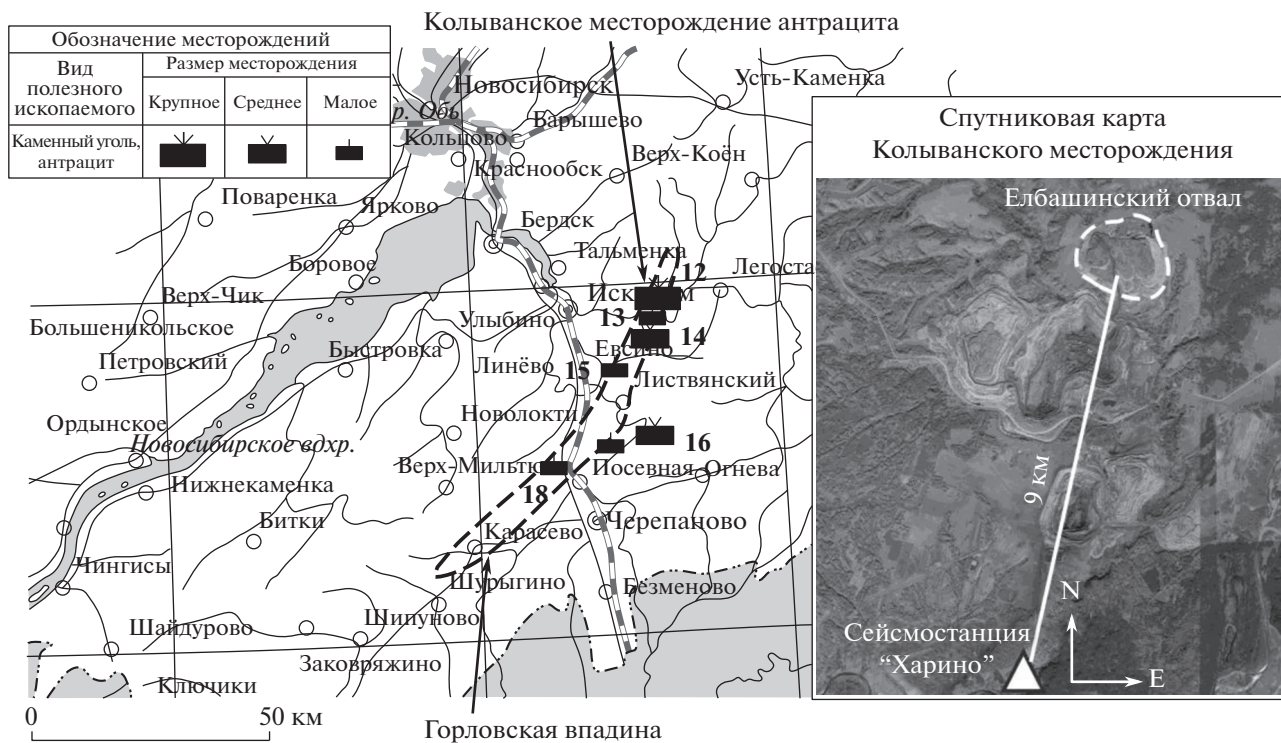


Рис. 2. Фрагмент карты угольных месторождений Новосибирской области [4].

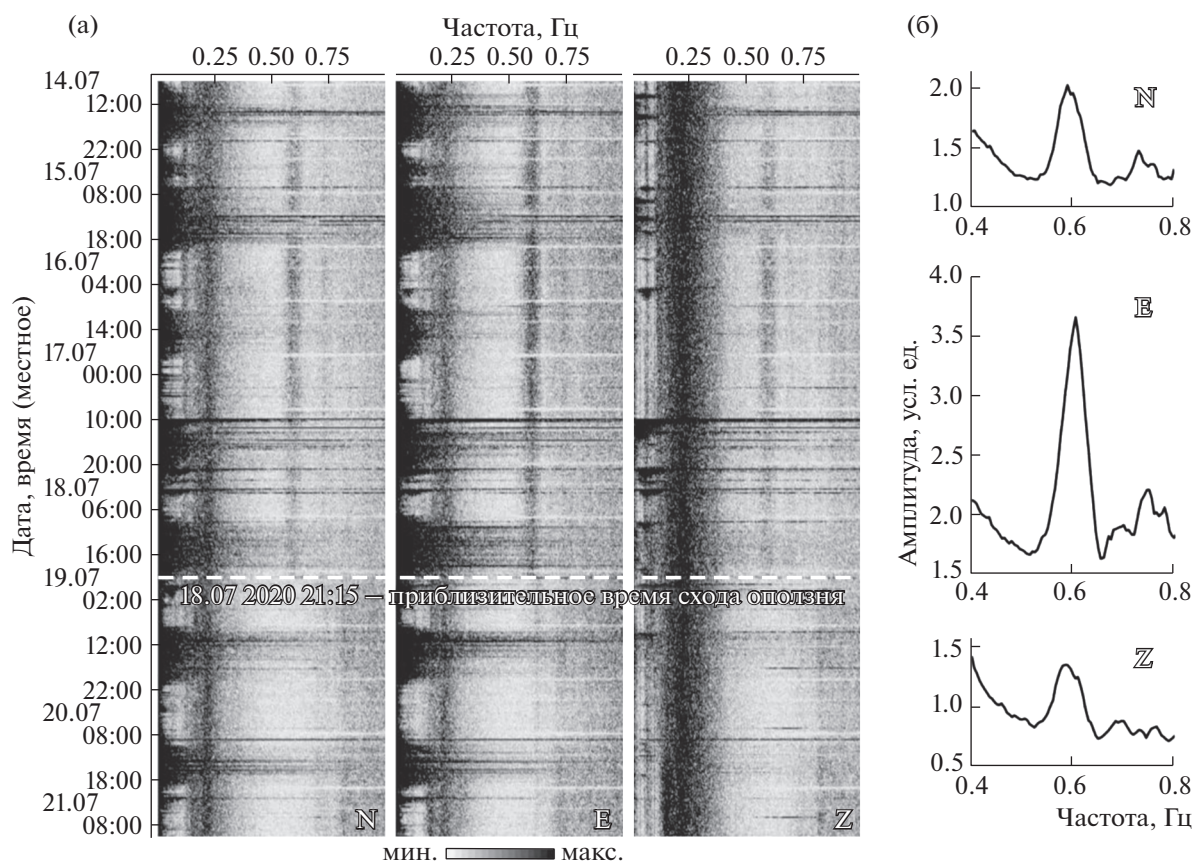


Рис. 3. Спектрограммы сейсмических данных станции “Харино” (а) и фрагменты усредненных спектров записей за интервал в 5 сут перед сходом оползня (б).

станция “Харино”. При анализе записей, полученных за период, охватывающий время схода оползня, не было выявлено каких-либо значимых сейсмических воздействий, которые могли бы быть достоверной причиной деформации. Возможно, такие воздействия и были, но из-за удаленности станции от отвала их амплитуда была меньше уровня сейсмического шума. Вместе с тем в сейсмическом шуме станции “Харино” обнаружены малоамплитудные сигналы, которые с высокой вероятностью могут быть связаны с колебаниями Елбашинского отвала, и интерпретация которых позволяет объяснить процессы, происходящие до и после схода оползня.

В ФИЦ ЕГС РАН разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющее проводить анализ изменений амплитудно-частотных характеристик сейсмических записей с течением времени. Для качественного анализа строятся спектрограммы в виде двумерных функций, по одной оси которых представлено время, по другой — частота; третьим измерением является амплитудой на определенной паре частота–время и представлено цветовой шкалой. Заложенные в программном обеспечении функции позволяют

отслеживать изменения амплитуд колебаний на выбранной частоте и рассчитывать усредненные амплитудные спектры в выбранном частотно-временном окне. Алгоритм вычисления последних состоит в расчете наборов амплитудных спектров для заданных временных интервалов, на которые разделяется сейсмическая запись, с их последующим усреднением. Это позволяет выделить из сейсмического шума полезные сигналы, имеющие квазистабильные спектры, по амплитуде на порядки ниже уровня шума, при условии достаточной длины записи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучая спектрограммы, полученные по записям станции “Харино” на N-, E- и Z-компонентах (соответственно, северная, восточная и вертикальная) за период с 14 по 21 июля 2020 г. мы можем отметить нетипичную для станций сейсмической сети картину шумов на низких частотах (рис. 3а). Видно, что в дневное время уровень низкочастотных шумов значительно выше, чем в ночное. Вероятно, это связано с режимом техники, работающей на карьерах и перевозящей

уголь. Можно предположить, что большегрузные машины создают такой уровень сейсмических колебаний, что формируются стоячие волны в объеме Горловской впадины. К сожалению, нам не удалось определить собственную частоту этих колебаний, но, по оценкам, она меньше нижнего предела технических возможностей аппаратуры (0.0083 Гц, что соответствует периоду 120 с). Колебания в интервале частот 0.1–0.35 Гц практически не меняются по амплитуде с течением времени, известны в сейсмологии и интерпретируются как отклик колебаний волн в морях и океанах.

Наиболее интересны колебания с частотой около 0.6 Гц, которые прослеживались непрерывно на всех компонентах записи и прервались после схода оползня. Это вполне могут быть собственные колебания Елбашинского отвала, если для оценки значений частот руководствоваться методикой [5]. Так, линейные размеры объекта, имеющего первую собственную частоту $f = 0.6$ Гц, могут составлять $L = V/2f$, где при скорости $V = 2.6$ км/с, $L \approx 2.2$ км, эта величина хорошо совпадает с размерами отвала. Кроме этого, можно заметить, что на Е-компоненте отмеченные колебания изменились: понизилась амплитуда и незначительно увеличилась частота. Вероятно, эти сигналы также связаны с колебаниями отвала, физические параметры которого поменялись после деформации. На рис. 3б показаны фрагменты усредненных спектров, вычисленных по сейсмической записи длиной в 5 сут перед моментом схода оползня. Видно, что наибольшая энергия колебаний сосредоточена на Е-компоненте. Если предположить, что они являются в основном поперечными волнами Лява, то можно оценить азимут на источник по соотношению амплитуд N- и Е-компонент — он составляет около 20° , что совпадает с направлением от сейсмостанции в сторону отвала.

Для повышения достоверности выявленной связи колебания с частотой 0.6 Гц с Елбашинским отвалом мы проанализировали архивные записи сейсмической станции за 10-месячный период — с 01.01.2020 по 31.10.2020. Отвал формировали не один год, поэтому колебания, связанные с ним, должны были прослеживаться длительное время. На рис. 4а показаны изменения фрагментов (в интервале частот 0.4–1.0 Гц) усредненных 5-суточных спектров сейсмической записи и соответствующие выделенным колебаниям изменения частот и амплитуд. При этом длина записи для вычисления единичного спектра составляла 200 с, что определило разрешенность спектра — 0.005 Гц. Выбрана для анализа Е-компонента как наиболее интенсивная по амплитуде, а результат усреднения соотнесен с серединой соответствующего временного интервала. Из рисунка видно, что на всех записях вплоть до момента деформации присутствуют колебания f_1 с

частотой, меняющейся в пределах 0.60–0.61 Гц, которые затем сменяются колебаниями f_2 с меньшей в несколько раз амплитудой и с частотой, повышенной до 0.620–0.625 Гц. Колебания f_2 после 30.08.2020 становятся практически неразличимыми, вероятно, из-за снижения их амплитуд.

Для подробного рассмотрения изменений характеристик исследуемых колебаний до и после схода оползня были построены наборы усредненных спектров за односуточные интервалы (рис. 4б). Видно, что примерно за 20 дней до деформации происходил постепенный рост амплитуд колебаний f_1 , а за 2 дня до оползня — их снижение. Амплитуда сменивших их колебаний f_2 примерно в 5–6 раз ниже.

Процессы, происходящие на Елбашинском отвале до и после деформации, с учетом анализа спутниковых снимков и записей сейсмической станции “Харино”, объясняются следующим образом. По фотографии оползня видно, что он распространился, подобно грязевому потоку на расстояние, существенно превышающее высоту отвала. Такое могло произойти только при условии, что породы были сильно обводнены. Как следует из космических снимков, основание отвала находилось на отметке 185 м над уровнем моря. Перед оползнем единственный дренажный канал находился на уровне 219 м, превышение 34 м. Площадь отвала более 2 км², отсюда можно оценить, что в нем находилась вода объемом не менее 7 млн м³ (при среднем водонасыщении 10%), которая и вытекла из тела отвала вместе с породой. Обводнение отвала являлась причиной его неустойчивости, что выражалось в его многомесячных колебаниях с частотой 0.6 Гц, характеристики которых изменились после деформации. Сход оползня привел к уменьшению массы отвала, и этим объясняется увеличение частоты колебаний, которое составило около 3%. На столько же должна была измениться масса отвала, если на колебания не повлияли другие факторы. После деформации огромные массы воды вместе с породой вытекли из тела отвала, и это привело к увеличению жесткости основания, что проявилось в резком уменьшении амплитуд колебаний. Вероятно, уже после оползня какая-то часть воды постепенно продолжала выходить из отвала. Этим можно объяснить, что колебания f_2 затихли примерно через месяц после события. Обводнение отвала и является основной причиной возникновения оползня. А что же явилось спусковым крючком? Какие явления способствовали его возникновению? Как отмечалось, анализ записей сейсмологической сети, окружающей месторождение, не выявил значимых сейсмических воздействий, которые могли бы спровоцировать сход оползня. Это позволяет полагать, что данная

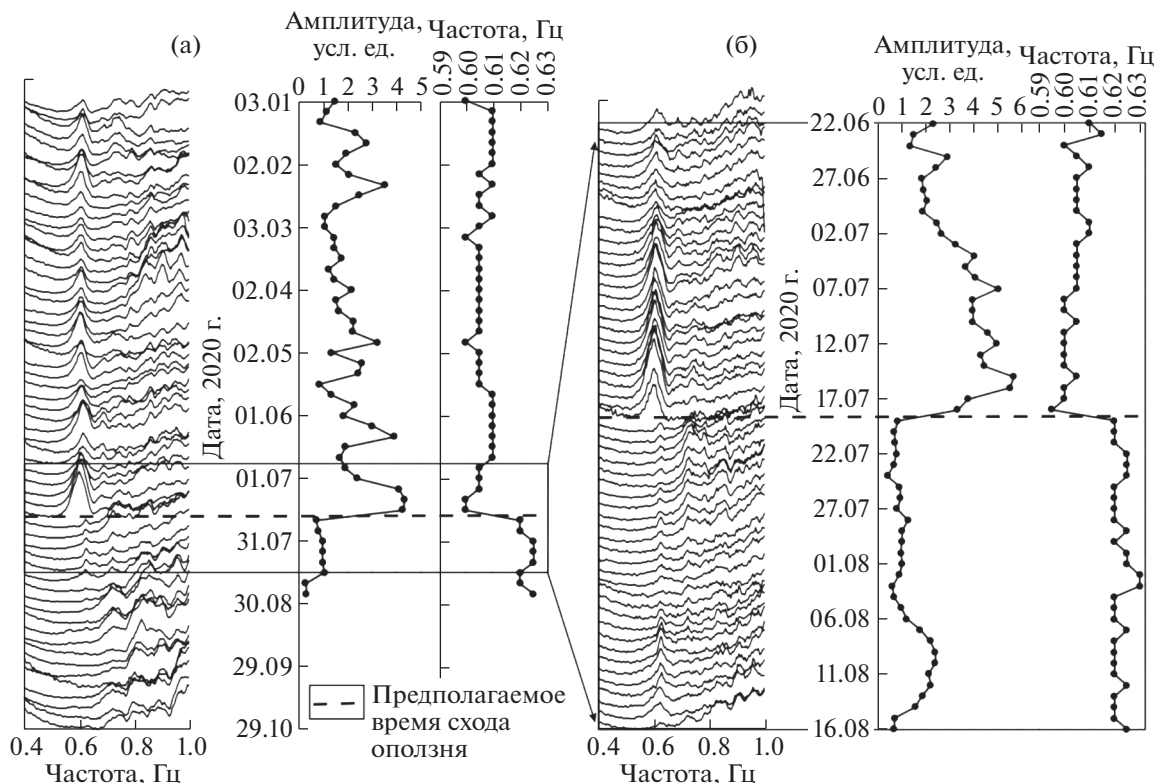


Рис. 4. Изменение колебаний отвала на усредненных спектрах записей E-компоненты сейсмостанции “Харино” и соответствующие им амплитуды и частоты. (а) – усреднение 5-суточных записей; (б) – односуточных.

деформация возникла по сценарию “последней капли”.

ринга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных космических снимков и сейсмологических записей позволил высказать предположение о причине возникновения и развития оползня на Елбашинском отвале Кольванского месторождения антрацита, как формирование значительных горизонтальных колебаний в теле отвала, которые при сильном обводнении последнего спровоцировали сход оползня. Выделенные в статье собственные колебания отвала позволяют теперь ставить целенаправленные работы по регистрации сейсмических шумов на подобных объектах и разбираться в связях обводненности пород с изменениями амплитудно-частотных характеристик собственных колебаний таких крупных объектов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического монито-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интервью с исполнительным директором АО “Сибирский Антрацит” С. Коломниковым. <https://ksonline.ru/380333/sergej-kolomnikov-my-dejstvovali-otkryto-i-operativno>
2. 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 // Seismological Research Letters. 2014. V. 85. № 4. С. 817–824.
3. 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. С. 015801.
4. Карта горючих полезных ископаемых. Новосибирская область. Сибирский федеральный округ. Электронный ресурс ФГБУ “ВСЕГЕИ” https://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas/sfo/novosibirskaya_obl/27_gorpi.jpg
5. Бат М. Спектральный анализ в геофизике. Москва. “Недра”, 1980 г. 535 с.

SEISMOLOGICAL OBSERVATIONS DURING A LANDSLIDE ON THE DUMP OF THE KOLYVAN ANTHRACITE DEPOSIT (NOVOSIBIRSK REGION)

V. S. Seleznev^{a,#}, A. V. Liseikin^a, A. F. Emanov^b, and V. M. Soloviev^b

^a *Seismological Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^b *Altay-Sayan Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[#] *e-mail: sel@gs.nsc.ru*

Presented by Academician of the RAS M.I. Epov January 11, 2021

There are presented the results of the analysis of satellite images and seismological materials at determining the causes of the landslide on the Yelbashinsky dump of the Kolyvan anthracite Deposit. There are demonstrated the possibilities of determining the natural vibrations of large objects from low-frequency seismological records and their monitoring.

Keywords: landslide, satellite images, seismological records, amplitude spectra, spectrograms, natural vibration frequencies