Геофизические технологии, № 4, 2022, с. 65–74 **www.rjgt.ru**
doi: 10.18303/2619-1563-2022-4-65 УДК 550.34.03

ОПЫТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИБОРТОВОГО МАССИВА ПРИ ОТКРЫТОЙ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С.С. Полозов[1], А.И. Быкадоров[2], А.С. Харламов[2], А.В. Зайцев[3]

[1]*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,*
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
[2]*ООО «Сибирский институт геотехнических исследований»,*
653000, Кемеровская область, Прокопьевск, ул. Карла Либкнехта, 4, оф. 210, Россия,
[3]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,*
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, Россия,
e-mail: i386@ngs.ru

В статье рассмотрены вопросы, связанные с разработкой сейсмологического оборудования и программного обеспечения, применительно к изучению сейсмической эмиссии, как предвестника деструктивных деформаций борта угольного карьера. Приводятся примеры записей типичных сейсмических воздействий. Показаны применяемые при обработке записей алгоритмы фильтрации и выделения событий.

Сейсмическая эмиссия, сейсмический регистратор, мониторинг борта карьера

EXPERIENCE OF EXPERIMENTAL RECORDING OF SEISMIC EMISSION OF THE SIDE ARRAY DURING OPEN MINING OF COAL DEPOSITS

S.S. Polozov[1], A.I. Bykadorov[2], A.S. Kharlamov[2], A.V. Zaitsev[3]

[1]*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*
[2]*Siberian Institute of Geotechnical Researches, Karla Libnekhta Str., 4, 210,*
Prokopievsk, Kemerovo Region, 653000, Russia,
[3]*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Institutskaya Str., 4/1,*
Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: i386@ngs.ru

The article deals with issues related to the development of seismological equipment and software, in relation to the study of seismic emission as a harbinger of destructive deformations of the side of a coal quarry. Examples of recordings of typical seismic impacts are given. The filtering and event selection algorithms used in the processing of records are shown.

Seismic emission, seismic recorder, monitoring of the side of the quarry

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных проблем при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом является устойчивость бортов карьеров. С нею связаны безопасность работ, вопросы технологии, предельные углы наклона бортов, предельная глубина отработки месторождений.

© С.С. Полозов, А.И. Быкадоров, А.С. Харламов, А.В. Зайцев, 2022

Основой инженерных методов оценки устойчивости откосов бортов и требований к инженерно-геологической изученности месторождений явилось многолетнее изучение оползневых явлений, возникающих на карьерах. Определение характера деформаций откосов, их причин и условий возникновения – основное при разработке мероприятий по предотвращению деформаций, изучение которых осуществляется путем постановки инструментальных наблюдений (как правило, маркшейдерских) на бортах карьеров (разрезов) и изучения инженерно-геологических условий деформирующихся участков. Работами прошлых лет [Фисенко, 1965] установлено, что даже в скальных породах опасным деформациям предшествуют длительно развивающиеся микродеформации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Деформационные процессы связаны с перераспределением напряженного состояния массива горных пород в результате разработки месторождения, что порождает локальные техногенные изменения в его структуре. Эти изменения ведут к увеличению числа микросейсмических событий, которые возможно зарегистрировать соответствующим геофизическим оборудованием (сейсмостанцией). Можно дать обобщенное определение сейсмической эмиссии как составляющей сейсмического фона, имеющей эндогенное происхождение. Такое определение не исключает существование целого класса явлений, сопровождающихся слабым сейсмическим излучением, которое может иметь различные механизмы генерации [Володин и др., 2014]. Авторы статьи предполагают, что рост сейсмической эмиссии является предвестником деструктивных нарушений грунта, повышающих вероятность неблагоприятного развития событий, в т. ч. возникновения аварийных ситуаций при разработке пласта. Здесь можно провести аналогию с форшоками – слабыми землетрясениями, произошедшими до деформации грунтового массива, являющейся причиной основного землетрясения. Применяя соответствующую постобработку сейсмических записей, можно выделить эти локальные сейсмические события и определить частоту их проявления.

Точное определение координат сейсмических явлений является важнейшей необходимостью, поскольку вся следующая обработка сейсмологических данных в определенной степени зависит от местоположения явления, а также от расстояния до станций [Мулев и др., 2011]. На данном этапе работ, авторами не налажена сеть станций на угольном месторождении, поэтому координаты микросейсмических событий не определялись, речь идет лишь о возможности выделения событий без количественных оценок параметров микросейсм, таких как сейсмический момент и сейсмическая энергия, необходимых для определения деструктивных зон.

АППАРАТУРНОЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Запись сейсмических колебаний проводилась с помощью переносного регистратора Sibgeo-AM (рис. 1), разработанного на базе ООО «Сибирский институт геотехнических исследований». Регистратор сертифицирован, налажено мелкосерийное производство.

Регистратор построен на основе 24-х разрядных АЦП (3 канала записи), имеет в своем составе навигационный приемник для определения текущего местоположения и времени, а также Wi-Fi и 3G/4G модули. Запись отсчетов АЦП производится на microSD карту. Примененные в конструкции АЦП являются по своей сути front end схемами, то есть совмещают в одном корпусе аналоговую (PGA) и цифровую (АЦП) части, что позволяет задавать различные коэффициенты усиления и различные частоты дискретизации.

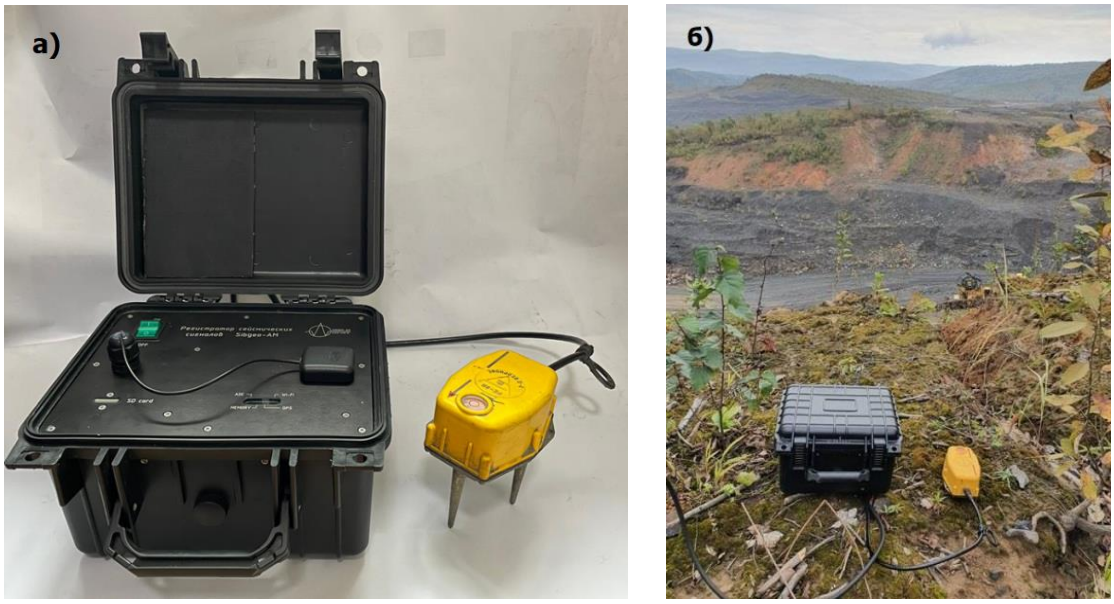

Рис. 1. а – Общий вид регистратора Sibgeo-AM с трехкомпонентным сейсмоприемником, изготовленным на основе геофонов SM-6 (производитель SENSOR Nederland bv); б – сейсмический регистратор Sibgeo-AM, установленный на борту угольного карьера

Примененные геофоны SM-6 (производитель SENSOR Nederland bv) имеют частоту собственных колебаний 4.5 Гц, коэффициент электромеханической связи 28.8 В/м/с и коэффициент демпфирования 0.6. Наличие 3G/4G и Wi-Fi модулей позволяет удаленно получать записи регистратора, если станция находится в пределах зоны покрытия сети соответствующего типа связи.

Сейсмостанция Sibgeo-AM, по сравнению с аналогичной аппаратурой, является относительно недорогим в сборке устройством. Также есть возможность объединять такие регистраторы в единую сеть. Это позволяет организовывать локальные сети сейсмических наблюдений на месторождениях, не выходя за рамки имеющегося бюджета.

Для просмотра и требуемой математической обработки была написана специализированная программа на языке Java Script. Сбор сейсмических данных осуществляется на сервер с помощью написанной на языке Python программы-сервера. Микроконтроллер STM32F405, использованный в разработке, имеет в своем составе уникальный идентификационный номер, который также передается станцией, что позволяет различать регистраторы в сети между собой.

Необходимость написания проприетарного ПО обусловлена в первую очередь наличием собственного формата станции, ее техническими характеристиками, а также требованиями к приему данных и их хранению. Известное авторам имеющееся в свободном доступе ПО, предназначенное для визуализации и обработки сейсмических записей, не подходит по этим параметрам.

Запись данных на сейсмостанции ведется покадрово, кадры имеют сквозную нумерацию и следуют один за другим. Каждый кадр – это определенная структура, содержащая в себе заголовок и оцифрованные данные сейсмометра. Объем этих сейсмических данных достаточно велик, поэтому для ускорения навигации по записи, а также для лучшего понимания сейсмической картины в целом, предусмотрен просмотр сейсмики с предварительной обработкой. В первую очередь эта предварительная обработка состоит в том, что из каждого кадра записи (1813 отсчетов) выбирается максимальное значение модуля записи и в базу данных записывается только оно и оно же отображается на навигационном

графике. Такой подход позволяет кардинально повысить скорость просмотра данных, а также повышает удобство навигации по записи – здесь мы сразу видим участки записи с повышенным уровнем сейсмических колебаний, которые и представляют основной интерес в плане решения геотехнологических задач. Для просмотра детальной записи геофонов данные берутся непосредственно из исходных двоичных файлов записи.

Следует различать причины, ведущие к росту сейсмического сигнала. В основном их можно разделить на две группы: ударные воздействия (взрывы, обрушения, землетрясения) и движение транспорта.

На рисунке 2 отображено типичное ударное воздействие с близкорасположенным источником колебаний. Оно имеет резкое первое вступление и в то же время можно заметить, что сейсмические волны не успели разделиться по типам, что свидетельствует о малом расстоянии источник–приемник. График на рис. 2, *а* – это выборка по максимуму модулей (одна точка на графике – один кадровый максимум), а рис. 2, *б* – это детальное отображение кадра записи (одна точка – один отсчет АЦП). Учтены калибровочные коэффициенты регистратора и сейсмоприемников, что позволяет просматривать запись в единицах, имеющих реальную физическую размерность (мкм/с).

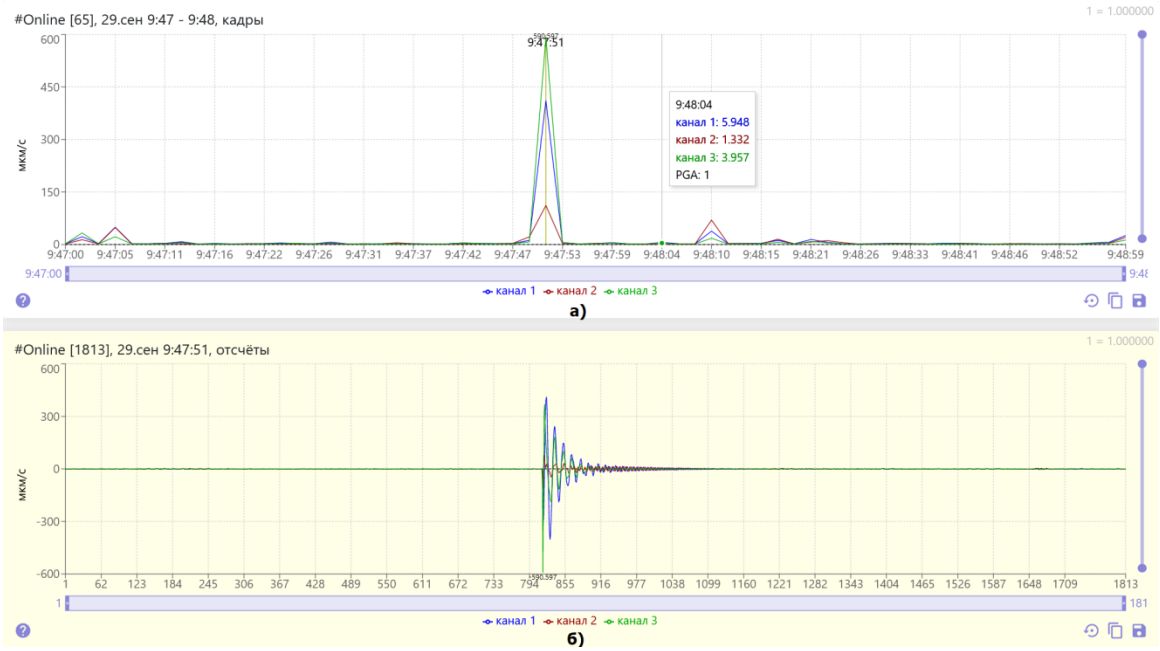

Рис. 2. Ударное воздействие с близкорасположенным источником колебаний: а – навигационный интерактивный график с отображениями кадровых максимумов; б – детальное отображение сейсмической записи

При колебаниях, вызванных движением транспорта (рис. 3), наблюдается плавное возрастание сейсмического сигнала, несвойственное ударным воздействиям, что позволяет уверенно отличить их от колебаний, вызванных источниками импульсного характера.

Источником, порождающим самые низкочастотные и продолжительные по времени колебания, являются взрывы и землетрясения. На рисунке 4 отображена запись начала землетрясения с близкорасположенным от местоположения станции эпицентром. Землетрясение произошло 2 ноября 2022 года в 6:29 в районе Междуреченска. Информация о времени и расположении эпицентра этого землетрясения была взята из оперативного сообщения о сейсмических событиях АСФ ФИЦ ЕГС РАН.

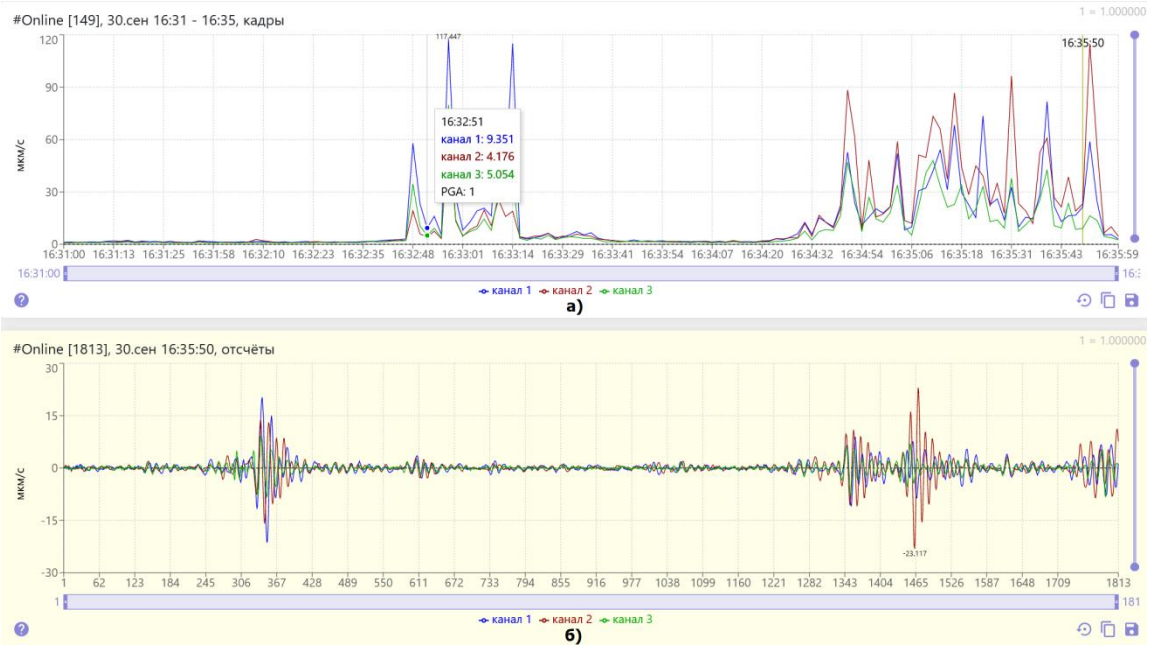

Рис. 3. Колебания, вызванные движением транспорта: а – навигационный график с кадровыми максимумами; б –детальное отображение сейсмической записи

Рис. 4. Сейсмическая запись начала землетрясения: а – навигационный график с кадровыми максимумами; б – детальное отображение сейсмической записи

Деформации, порождающие сейсмическую эмиссию, вызванную разрушением горного массива при добыче угля, носят, в основном, локальный характер. Как показывает опыт авторов статьи – это некий «треск», импульсные, сравнительно высокочастотные в масштабах сейсмологии колебания. Поэтому для их выделения логично в первую очередь воспользоваться ВЧ фильтром. Был использован ВЧ фильтр Баттерворта четвертого порядка с частотой среза 150 Гц, реализованный в виде БИХ фильтра (фильтра с бесконечной импульсной характеристикой). Конечно-разностные уравнения, описывающие поведение такого фильтра, имеют следующий вид:

$$A = 2e^{-2d_1\omega_0\Delta t}\cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_1^2}) + 2e^{2d_2\omega_0\Delta t}\cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_2^2}),$$

$$B = e^{-2d_1\omega_0\Delta t} + e^{-2d_2\omega_0\Delta t} + 4e^{-\omega_0\Delta t(d_1+d_2)}\cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_1^2})\cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_2^2}),$$

$$C = 2e^{-\omega_0\Delta t(2d_1+d_2)}\cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_2^2}) + 2e^{-\omega_0\Delta t(2d_2+d_1)}\cos(\omega_0\Delta t\sqrt{1-d_1^2}),$$

$$D = e^{-2\omega_0\Delta t(d_1+d_2)},$$

$$x_n = Ax_{n-1} - Bx_{n-2} + Cx_{n-3} - Dx_{n-4} + (1 - A + B - C + D)\left(\frac{f_d}{2\pi f_0}\right)^4 (f_n - 4f_{n-1} + 6f_{n-2} - 4f_{n-3} + f_{n-4}),$$

где A, B, C, D – постоянные фильтра, ω_0, f_0 – частота среза фильтра, $\Delta t, f_d$ – интервал и частота дискретизации, d_1, d_2 – коэффициенты демпфирования фильтра, x_n – выходные значения фильтра, f_n – входные значения фильтра.

Разностные уравнения получены с использованием частного случая способа инвариантности импульсной реакции – методом подбора корней [Смит, 1980].

В полученном рекуррентном соотношении последующие выходные значения зависят от предыдущих, следовательно, их внутреннее представление и арифметические операции с ними должны иметь достаточно большую разрядность, дабы избежать накопления систематической ошибки при вычислениях. Реализация языка программирования JavaScript, использованная авторами статьи, такую точность обеспечивает.

Рассмотрение и учет при расчете сейсмической эмиссии более низкочастотных колебаний нецелесообразны, так как благодаря самой физической модели распространения упругих волн высокие частоты колебаний, вызванные удаленными от расположения сейсмостанции источниками, быстро затухают. Следовательно, после фильтрации в записи останутся только высокочастотные компоненты локальных событий, которые и представляют интерес в рамках части решаемой задачи. Однако для выделения взрывов и землетрясений, следует воспользоваться НЧ фильтром.

Для выделения отдельных импульсных событий из общего микросейсмического фона авторы воспользовались известным в сейсмологии алгоритмом STA/LTA (Short Time Average/Long Time Average), который представляет собой вычисление параметра SNR (Signal to Noise Ratio):

$$STA_k = \frac{1}{N_{STA}}\sum_{i=1}^{N_{STA}} |f_{k+i}|,$$

$$LTA_k = \frac{1}{N_{LTA}}\sum_{i=1}^{N_{LTA}} |f_{k-i}|,$$

$$SNR_k = \frac{STA_k}{LTA_k}.$$

В случае превышения порогового значения STA/LTA событие считается обнаруженным [Allen, 1982]. При обнаружении отдельных импульсных событий, связанных с сейсмической эмиссией, становится

возможным их подсчет и последующее вычисление частоты их проявления. На рисунке 5 отображены кадровые максимумы за промежуток времени, при котором сейсмическая эмиссия имела повышенный уровень, данные показаны без фильтрации.

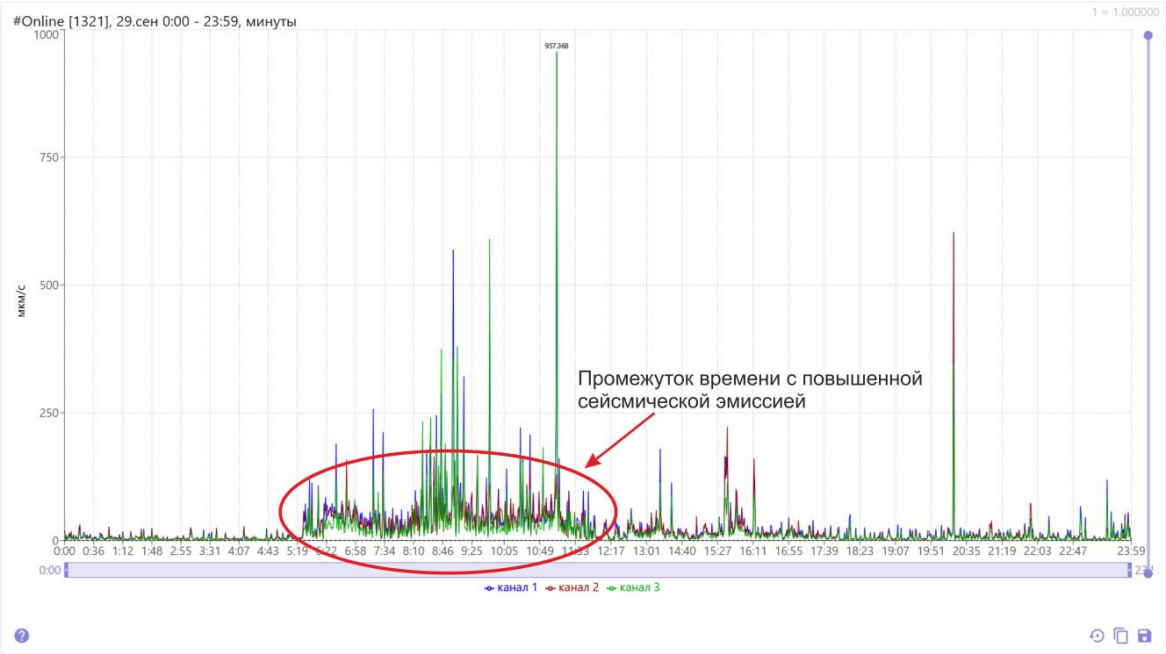

Рис. 5. Повышение сейсмической эмиссии относительно фоновых значений, кадровые максимумы

После применения ВЧ фильтра с частотой среза 150 Гц и обработки результата фильтрации по алгоритму STA/LTA можно выделить отдельные микросейсмические события (рис. 6).

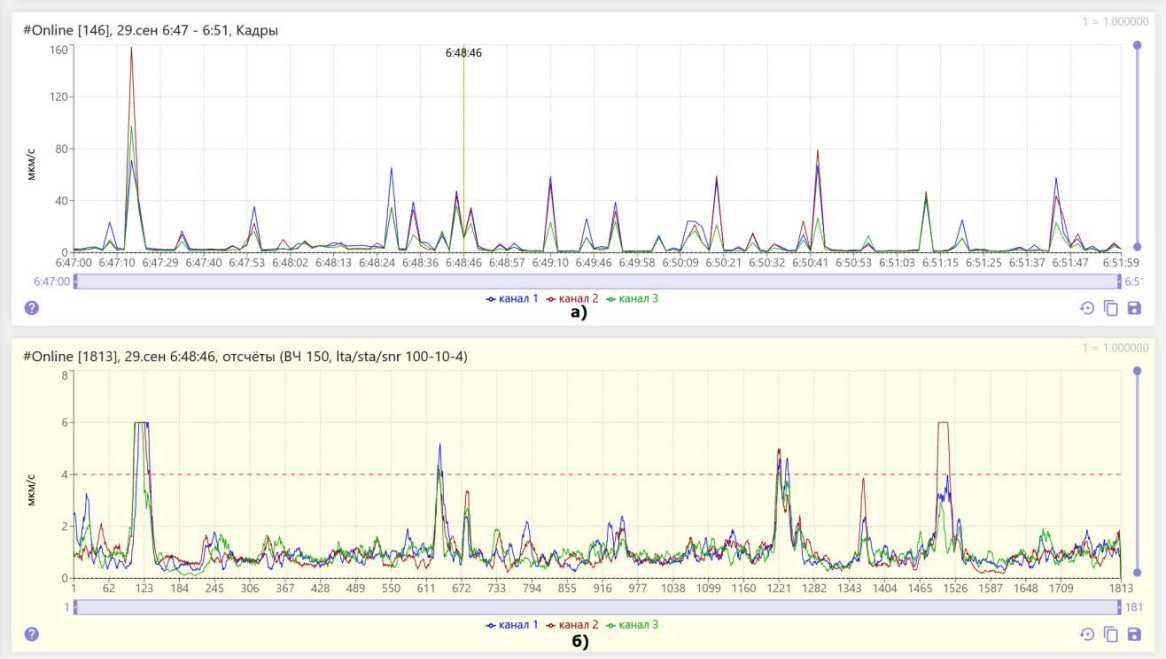

Рис. 6. Результат обработки записи ВЧ фильтром с частотой среза 150 Гц и алгоритмом STA/LTA с пороговым значением 4 и шириной окон 10 и 100 отсчетов: а – навигационный график с кадровыми максимумами; б – отображение параметра SNR, горизонтальной пунктирной линией обозначен пороговый уровень

После выделения отдельных микросейсмических событий становится возможным расчет частоты их проявления. На рисунке 7 представлен график, отображающий частоту проявления событий за тот же временной интервал, что и на рис. 5 – сутки 29.09.22. События на графике подсчитываются по временным интервалам один час. Всего алгоритмом STA/SLA было зафиксировано 4512 событий за сутки. Сплошными линиями обозначены максимумы ВЧ составляющих виброскорости, зарегистрированные за один час, количественное их обозначение находится на вертикальной оси слева. Пунктирная линия отражает количество высокочастотных микросейсмических событий за один последующий точке графика час, в сумме по трем каналам, их количественное обозначение находится на вертикальной оси справа. Таким образом, по информации из одного графика можно оценить максимальную амплитуду событий за час и частоту их регистрации. Можно заметить, что амплитуда зарегистрированных микросейсм коррелирует с частотой их проявления.

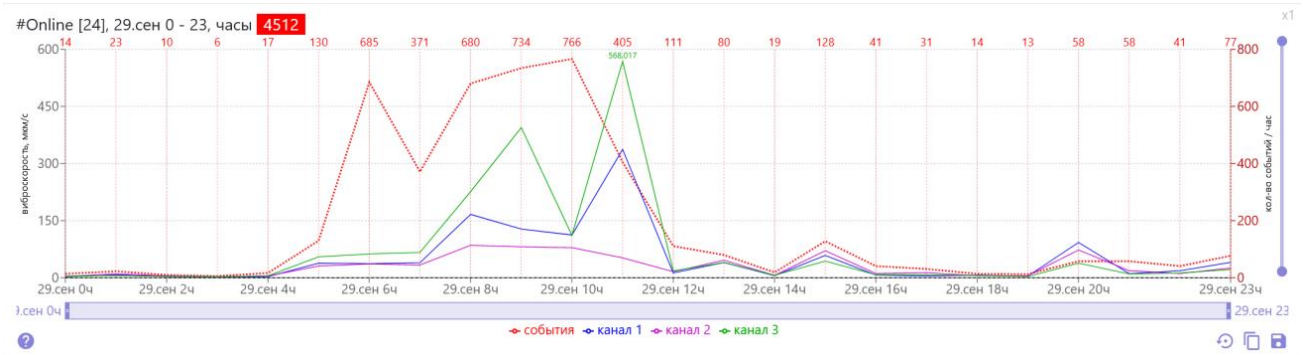

Рис. 7. Частота проявления высокочастотных микросейсмических событий за одночасовые периоды времени 29 сентября 2022 (пунктирная линия) и максимальные значения виброскорости за одночасовые интервалы времени (сплошные линии)

Более подробно можно рассмотреть те же самые данные, изменив масштаб горизонтальной оси с часового на минутный, результат представлен на рис. 8.

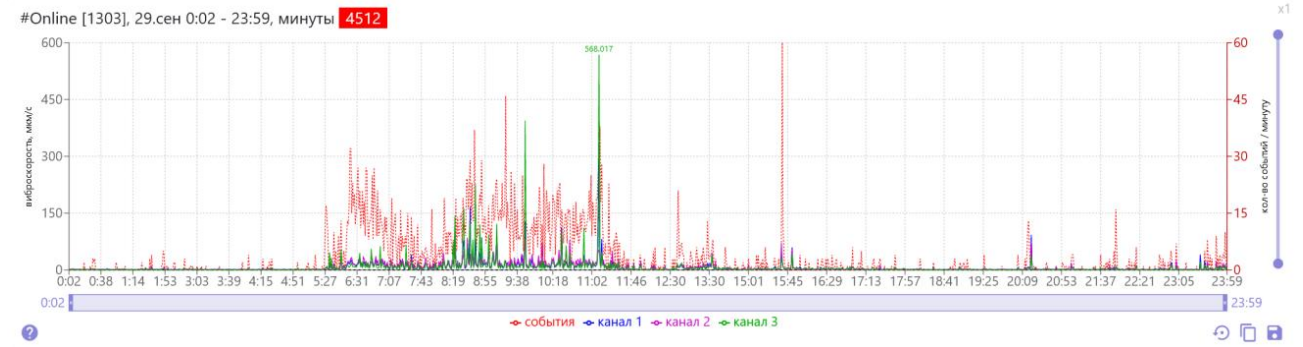

Рис. 8. Частота проявления высокочастотных микросейсмических событий за одноминутные периоды времени 29 сентября 2022 (пунктирная линия) и максимальные значения виброскорости за одноминутные интервалы времени (сплошные линии)

ВЫВОДЫ

Сейсмическая эмиссия, сопровождающая переупаковку блоков в горном массиве и высвобождение энергии накопленного напряженного состояния, может быть зарегистрирована сейсмостанцией. Оперативный контроль деформаций или маркшейдерская съемка не всегда возможны,

поэтому такая регистрация может быть одним из важных факторов заблаговременного выделения потенциальных деструктивных изменений структуры откоса борта карьера.

Точное определение координат сейсмических явлений является необходимым условием для определения параметров микросейсм, позволяющих оконтурить потенциально деструктивные зоны. Основные параметры, которые определяют опасность ситуации в объеме горных пород, сейсмический момент и энергия сейсмического события, могут быть рассчитаны только при локализации микросейсмических событий, что требует развертывания сети сейсмических наблюдений на месторождении.

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0017.

ЛИТЕРАТУРА

Володин И.А., Казанкова Э.Р., Чеботарева И.Я. Механизмы генерации и способы регистрации сейсмического, акустического и электромагнитного излучения из продуктивных пластов нефтяных и газовых месторождений при применении стимулирующих методов повышения нефтегазоотдачи // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. – 2014. – № 1 (9). – С. 17.

Мулев С.Н., Гурин А.Н., Назима В.В., Гурин Д.А. Методика организации сейсмических наблюдений на территории Уральского региона. – Санкт-Петербург, 2011. – 77 с.

Смит Д.М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.

Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965. – 378 с.

Allen R. Automatic phase pickers: Their present use and future prospects // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1982. – Vol. 72 (6). – P. S225–S242.

REFERENCES

Allen R. Automatic phase pickers: Their present use and future prospects // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1982. – Vol. 72 (6). – P. S225–S242.

Fisenko G.L. Stability of the sides of quarries and quarry dumps [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1965. – 378 p.

Mulev S.N., Gurin A.N., Nazima V.V., Gurin D.A. Methods of organizing seismic observations on the territory of the Ural region [in Russian]. – St. Petersburg, 2011. – 77 p.

Smith J.M. Mathematical modeling and digital simulation for engineers and scientists. – Wiley-Interscience, 1977. – 448 p.

Volodin I.A., Kazankova E.R., Chebotareva I.Ya. Mechanisms of generation and methods of registration of seismic, acoustic and electromagnetic radiation from productive layers of oil and gas fields when using stimulating methods to increase oil and gas recovery // Georesources, Geoenergetics, Geopolitics – 2014. – Vol. 1 (9). – P. 17.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ПОЛОЗОВ Станислав Сергеевич – ведущий электроник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка геофизического оборудования, инженерная геофизика.

БЫКАДОРОВ Алексей Иванович – генеральный директор ООО "Сибирский институт геотехнических исследований". Основные научные интересы: геотехнология открытая, подземная, строительная, сейсмический мониторинг.

ХАРЛАМОВ Алексей Сергеевич – руководитель отдела геофизических методов исследования ООО "Сибирский институт геотехнических исследований". Основные научные интересы: сейсмология, инженерная сейсморазведка, электротомография.

ЗАЙЦЕВ Александр Васильевич – старший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование процессов физики сплошной среды.