

ИЗМЕНЕНИЕ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ МОЩНОМ ВИБРАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.А. Брыксин¹, В.С. Селезнев^{2,3}

¹ Сейсмологический филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Геофизическая служба СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Изучается изменение свойств геологической среды в окрестности стационарного 40-тонного вибрационного источника во временных интервалах, лежащих между вибрационными сессиями. Экспериментально определена зависимость оценки количества выделенной средой энергии по времени от значения частоты амплитудного спектра. Авторами введен параметр (α), характеризующий эту зависимость и установлена линейная закономерность роста его модуля в перерывах серии включений вибрационного источника при проведении полевых наблюдений. Сформулировано предположение о возможности выделения зон, обладающих свойством быстро менять свое напряженное состояние как накапливая, так и отдавая накопленную энергию. Сравнительный анализ напряженного состояния области эксперимента показал существенные различия в пространственном распределении градиента нового параметра (β) до и после активных низкочастотных воздействий на геологическую среду.

Сейсмоакустическая эмиссия, амплитудный спектр, мощные вибрации.

CHANGE IN THE AMPLITUDE SPECTRUM OF SEISMOACOUSTIC EMISSION UNDER STRONG VIBRATION

A.A. Bryksin and V.S. Seleznev

We study changes in the properties of the geologic environment in the vicinity of a stationary 40-ton vibration source in time intervals between vibration sessions. The relationship between the estimated amount of energy released by the environment over time and the frequency of the amplitude spectrum was determined experimentally. We introduced a parameter (α) that characterizes this relationship and determined that its absolute value increases linearly in the time intervals between operations of the vibration source in field observations. It is hypothesized that there are zones that have the property to change rapidly their stress state by both accumulating and releasing energy. Comparative analysis of the stress state of the area of the experiment showed significant differences in the spatial distribution of the gradient of the new parameter (β) before and after active low-frequency effects on the environment.

Seismoacoustic emission, amplitude spectrum, powerful vibrations

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы растет интерес к изучению эффекта сейсмоакустической эмиссии, причем по нескольким направлениям. С одной стороны, — это задачи прямого поиска залежей углеводородов (технология АНЧАР [Графов и др., 1998]), с другой, — исследование свойств месторождений, находящихся в разработке [Бережной и др., 2003], и получение дополнительной информации о технологических процессах в скважинах [Брыксин и др., 2014] на примере гидравлического разрыва пласта. Как правило, исследования ведутся в инфразвуковом диапазоне или же по всему спектру частот [Колесников и др., 2014].

В статье [Брыксин, Селезнев, 2012] авторами в числе прочего исследовался коэффициент угла наклона прямой, аппроксимирующей значения десятичного логарифма оценки энергии микросейсмических колебаний в зависимости от частотного диапазона спектра сигнала, записанного сейсмической станцией. Поскольку полученный результат для одной станции оказался достаточно интересным, в июле 2014 г. на Быстровском вибрационном полигоне, где установлен мощный 40-тонный вибрационный источник [Алексеев и др., 2004], был проведен следующий эксперимент.

При воздействии мощного вибрационного источника мы наблюдали, что индуцированная сейсмоакустическая эмиссия последовательно возрастала в некоторой его окрестности как в промежутке меж-

ду сеансами воздействия, так и в течение некоторого времени после их завершения; затем состояние среды постепенно приходило к естественной форме.

Цель данной статьи — изучение способности среды снимать и восстанавливать присущее ей упругое напряжение, используя экспериментальные сведения об изменениях во времени амплитудных спектров сигналов, зарегистрированных в различных точках.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Дадим формальное математическое определение численной характеристики спектральных составляющих сигнала, которая будет использоваться в статье.

Пусть T и F — длина (с) и шаг (Гц) интервалов (окон) для временного и частотного диапазонов записи соответственно; τ — момент времени, соответствующий середине окна T ; f — изучаемая частота сигнала, центр окна F . Тогда интегральная амплитудная характеристика спектра анализируемого сигнала $x(t)$ в этих окнах может быть выражена как

$$A(\tau, f) = \int_{f-F/2}^{f+F/2} \left| \int_{\tau-T/2}^{\tau+T/2} x(t) e^{-2\pi i \omega t} dt \right| d\omega. \quad (1)$$

Предметом нашего анализа является дискретная запись, т.е. некоторый набор значений $x(t_i)$. Поскольку параметры T и F являются константами для всех значений τ и f , то при переходе к дискретным вычислениям имеет смысл применить следующую систему условных обозначений.

Положим, что K — число сейсмических станций, синхронно ведущих запись; N — количество временных интервалов, в которых производится расчет данных, M — число исследуемых интервалов частот. Тогда величина A_{ij}^k , являющаяся дискретным аналогом (1), характеризует оценку энергии микросейсм, зафиксированную станцией $k \in (1 \dots K)$ на интервале времени суммирования $\tau_i \in (\tau_1 \dots \tau_N)$ в диапазоне частот $f_j \in (f_1 \dots f_M)$.

Предположим, что существует функциональная взаимосвязь для нисходящей ветви амплитудного спектра в виде

$$\lg(A_{ij}^k) = \alpha_i^k f_j + c_i^k, \quad (2)$$

где c_i^k — константа, а величину α_i^k назовем по определению **линейным параметром амплитудного спектра микросейсм** (ЛПАСМ) на τ_i временном интервале анализа для станции (пикета) с номером k . Вычисление коэффициентов c_i^k и α_i^k происходит путем решения переопределенной системы линейных уравнений для фиксированных значений номера станции (k) и временного интервала (i). Отметим, что в рамках этой статьи мы усредняли десятичный логарифм оценки энергии для всех трех зарегистрированных компонент данных.

Обоснуем возможность использования соотношения (2). Согласно теореме Парсеваля, энергия сигнала во временной и частотной областях связаны как

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x^2(t)| dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega, \quad (3)$$

где $X(\omega)$ является представлением сигнала в частотной области, полученным с помощью преобразования Фурье. По аналогии с (1) представим энергию во временном окне и в частотном диапазоне как

$$E(\tau, f) = \int_{f-F/2}^{f+F/2} \left| \int_{\tau-T/2}^{\tau+T/2} x(t) e^{-2\pi i \omega t} dt \right|^2 d\omega. \quad (4)$$

Существует эмпирическое соотношение, связывающее энергию и период (или частоту) сигнала [Левин и др., 2010]:

$$\lg(E(\tau, f)) = \alpha^* \lg(T) + c^* = \alpha^* \lg\left(\frac{1}{f}\right) + c^*. \quad (5)$$

Поскольку на интересующем нас диапазоне частот (от 15 до 45 Гц) f и $-\lg\left(\frac{1}{f}\right)$ являются практически линейно-зависимыми (коэффициент линейной корреляции равен 0.99) и численно установлена линейная зависимость между $\lg(A(\tau, f))$ и $\lg(E(\tau, f))$ с коэффициентом линейной корреляции равным 0.98 (при фиксированном значении одной из переменных), то использование (2) для расчетов является допустимым.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для получения записей сейсмического волнового поля в окрестности 40-тонного вибрационного источника на полигоне в районе с. Быстровка Новосибирской области 9 июля 2014 г. были установлены 52 цифровых трехканальных автономных регистратора Байкал-АСН. Запись с частотой дискретизации 500 Гц проводилась в течение 48 ч (05:00, 08.07.2014 — 05:00, 10.07.2014, время UTC), схема расположения сейсмостанций приведена на рис. 1. В течение всего времени проведения наблюдений в районе полевых исследований стояла ясная безветренная погода.

Дебалансный 40-тонный вибрационный источник, расположенный в центре системы наблюдений (точка 48, см. рис. 1), включался в описанный выше период времени девять раз (первое кратковременное тестовое включение и восемь рабочих). Данный вибратор имеет платформу площадью 12 м² и резонансную частоту с грунтом 7.4 Гц. В рамках представляемой работы мы изучали записи регистраторов в интервале с 14:00, 08.07.2014 по 17:00, 09.07.2014, время UTC.

Данные. Установленные сейсмические станции Байкал-АСН записывали поток данных с датчиков GS-One и GS20-DX, имеющих схожие характеристики. Запись производилась часовыми файлами, компонента X была направлена на виброисточник. Для анализа были оставлены записи станций, без сбоев проработавших с 05:00, 08.07.2014 по 17:00, 09.07.2014 (время UTC) ч, всего 43 единицы (соответствует количеству станций K).

Выбор окон анализа. В интересующий нас отрезок времени (28 ч), который характеризуется включениями вибрационного источника в режиме планового вибромониторинга, график зависимости оценки выделенной энергии микросейсмических колебаний на частотах 12.5—47.5 Гц от времени, рассчитанной по формуле (1), соответствует приведенному на рис. 2. График построен для одной точки (ст. 8), окно $T = 20$ с, на оси X (см. рис. 2) приведены первые сутки построения.

Заметим, что поскольку время задержки между включениями вибратора примерно соответствует одному часу, мы всегда можем выделить 30 мин в разрыве сеансов вибромониторинга, на которые работа включенной вибрационной установки не влияет, а, следовательно, идет запись только сигналов микросейсмических колебаний. Таким образом, естественно определить длину интервала суммирования по времени $T = 30$ мин (1800 с). Логично выбрать шагом по интервалам суммирования 2 ч: таким



Рис. 1. Спутниковый снимок местности с нанесенными точками регистрации.

Белые треугольники соответствуют точкам наблюдения, BSTK — обозначение сейсмостанции Быстровка.

образом, мы обеспечиваем равномерность распределения интервалов анализа по оси времени. В частотной области будем исследовать интервал от 15 до 45 Гц с шагом в 5 Гц ($F = 5$) и дискретизацией 0.1 Гц. Эти параметры установлены экспериментально, и общее число исследуемых частот равно семи. Частоты ниже 12.5 Гц не брались в рассмотрение, поскольку собственная частота сейсмоприемников лежит в районе 10 Гц, а выше 47.5 Гц — из соображений быстрого затухания волн на этих частотах спектра. Окно осреднения шириной в 5 Гц является достаточным для сглаживания возможных пиков на амплитудном спектре, а дискретизация в 0.1 Гц обеспечивает разумную точность при суммировании в частотном диапазоне.

Дополнительно выделим пять получасовых временных интервалов, обозначенных римскими цифрами в индексе, они попадают на время сеансов вибратора и будут использованы в процессе обсуждения: с их помощью мы покажем, что зарегистрированные в это время амплитуды колебаний грунта

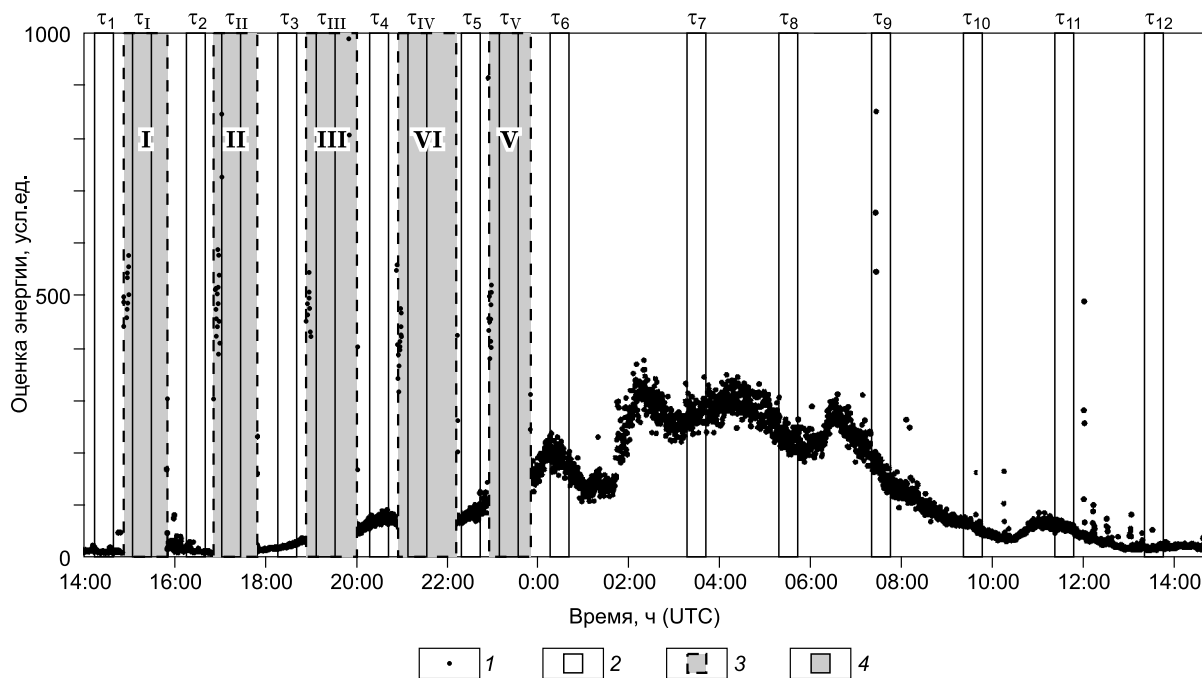


Рис. 2. Зависимость выделенной энергии микросейсм от времени.

Римские цифры соответствуют сеансам работы вибратора. Значение τ_i с арабским индексом соответствует интервалу анализа. 1 — оценка энергии на интервале 20 с, 2 — интервалы суммирования амплитуд (30 мин), 3 — интервалы работы вибратора, 4 — интервалы анализа сеансов вибратора (30 мин).

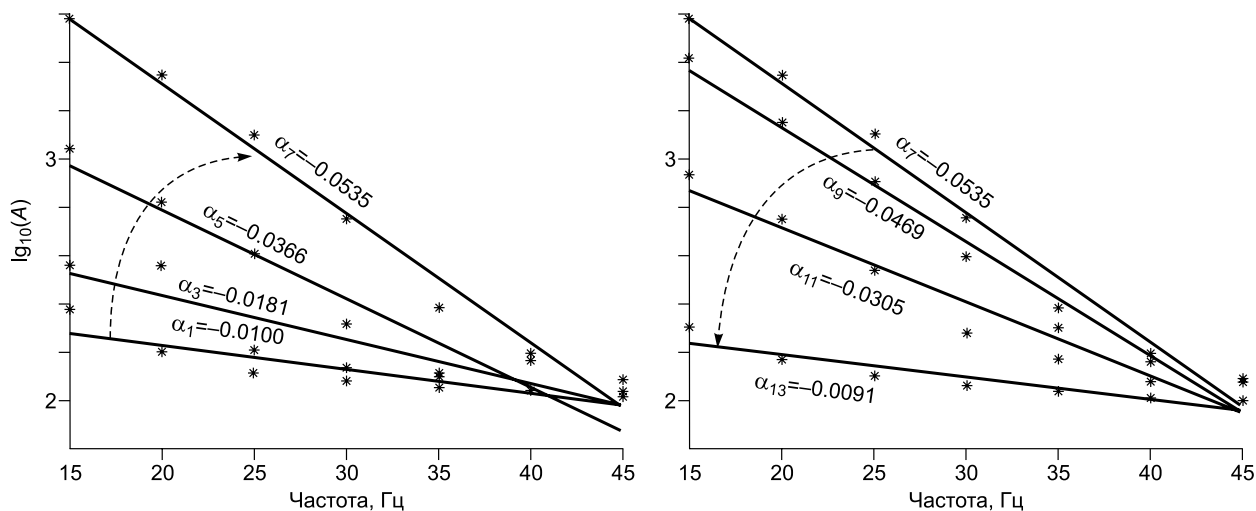


Рис. 3. Зависимость ЛПАСМ от временного интервала анализа.

Индекс ЛПАСМ соответствует интервалу τ_i на рис. 2.

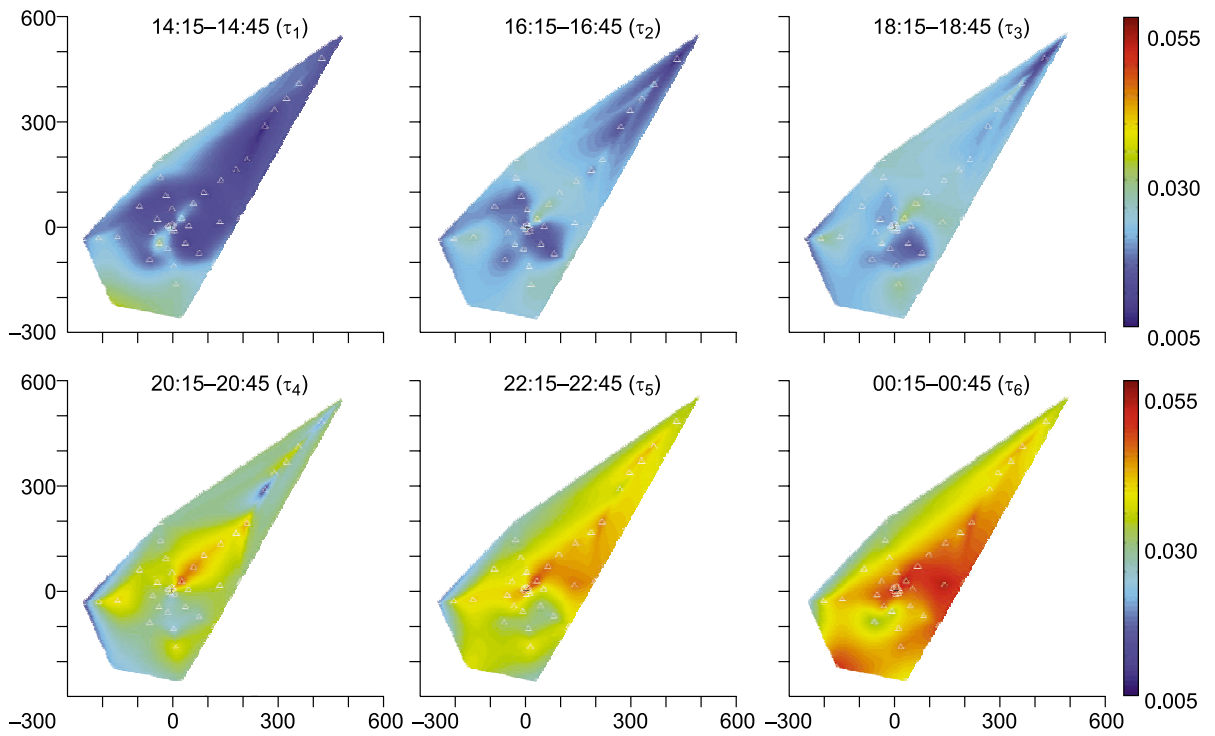


Рис. 4. Картирование характеристики ЛПАСМ на интервалах анализа 1—6 (здесь и на рис. 5, 7, 8, 12: шкала в модулях величин).

На всех рисунках с картами — белые треугольники соответствуют расположению сейсмических станций, черный крест — вибратору, оси отложены в м.

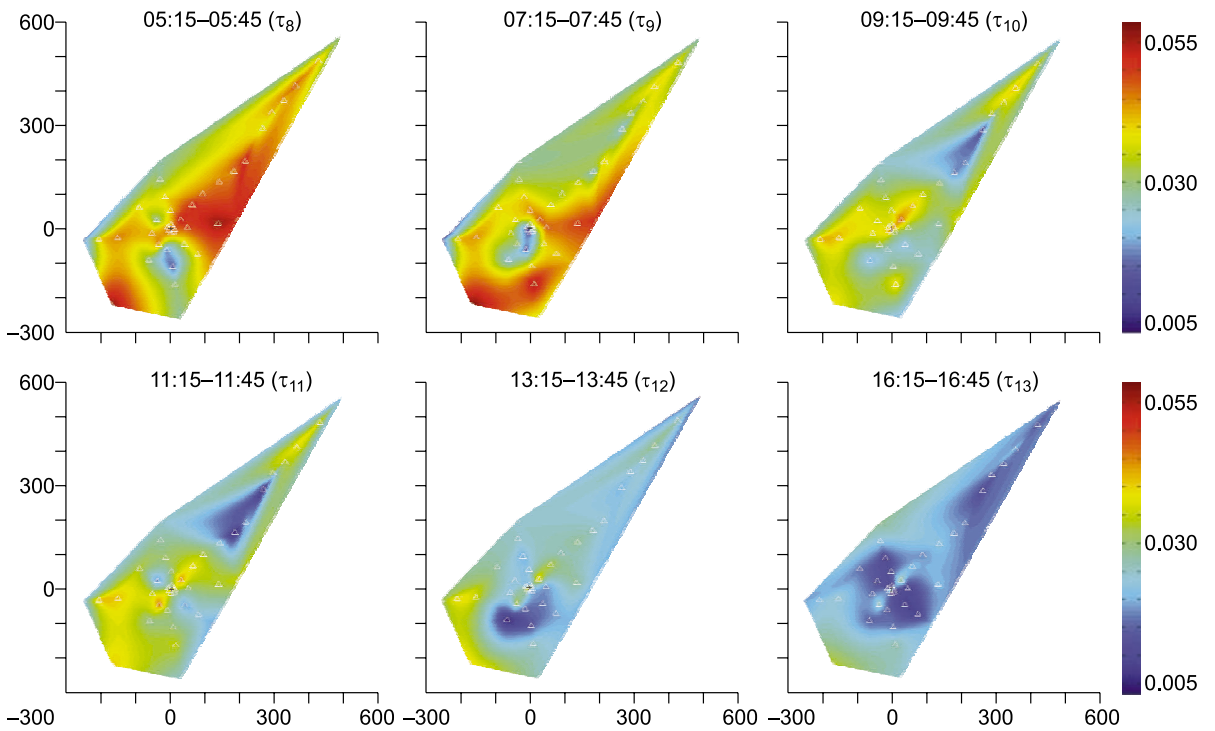


Рис. 5. Картирование характеристики ЛПАСМ на интервалах анализа 8—13.

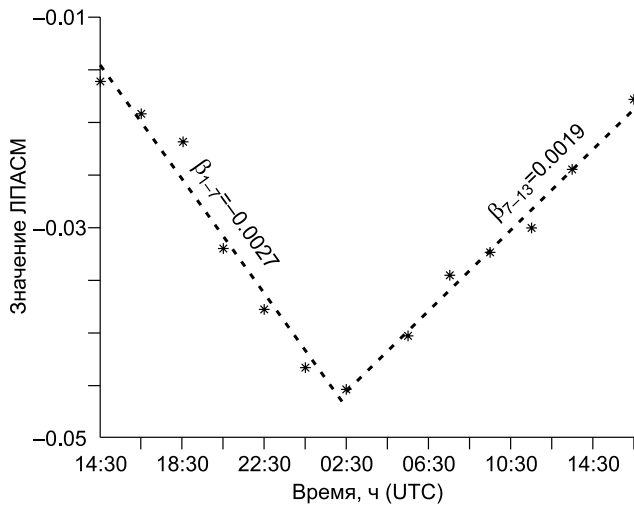


Рис. 6. Характеристика изменения ЛПАСМ в среднем по интервалам анализа.

убывают пропорционально удалению от источника, и период активного воздействия прогнозируемо.

Обработка данных. С учетом всех вышеприведенных ограничений для каждой из станций на каждом временном интервале по дискретному аналогу формулы (1), используя линейное допущение (2), методом наименьших квадратов были рассчитаны параметры α_i^k .

Численным расчетом установлено, что значение модуля ЛПАСМ растет на интервалах анализа 1—7, после чего снижается на интервалах 7—13 (отметим, что интервал 13 отсутствует на рис. 1, для его лучшей читаемости; рис. 3).

Характер поведения ЛПАСМ для точки наблюдения 8 иллюстрирует рис. 3, однако в общем случае эта закономерность прослеживается для всех точек.

Важно отметить, что седьмой интервал анализа τ_7 является точкой перелома, поскольку условно с этого момента времени можно наблюдать уменьшение количества оценки выделенной энергии микросейсмических колебаний.

Установив эту закономерность (последовательное возрастание и затем убывание значения параметра по модулю) следует попытаться построить карты значения ЛПАСМ в рамках интерполяционных значений (рис. 4, 5).

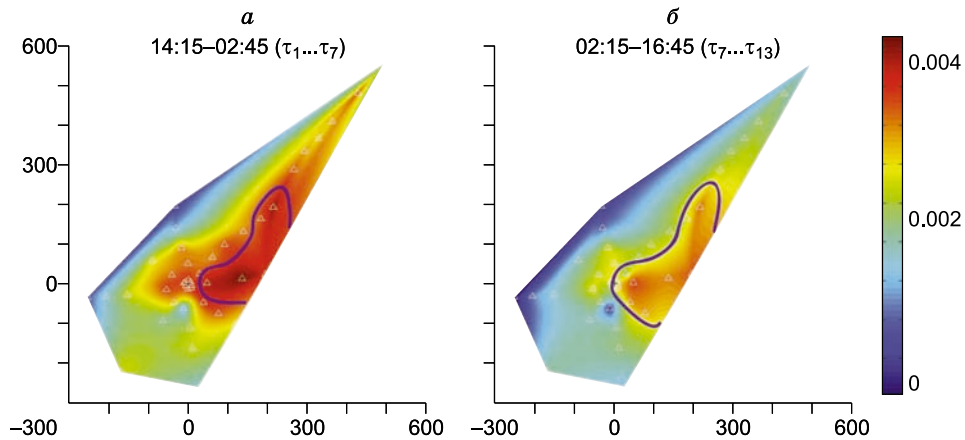


Рис. 7. Распределение скорости роста (а) и падения (б) модуля ЛПАСМ на интервалах анализа.

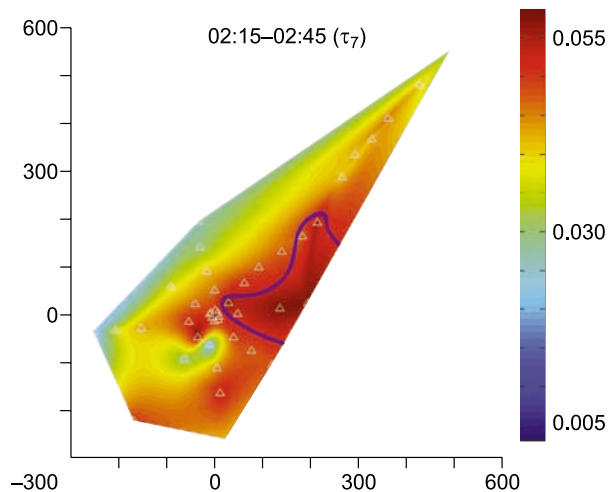
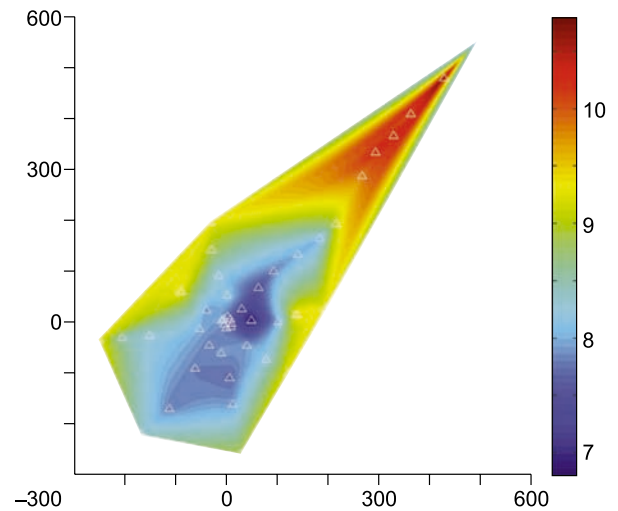


Рис. 8. Картирование модуля ЛПАСМ на интервале 7 с нанесенной аномальной зоной.

Рис. 9. Карта первых собственных частот исследуемого района (цветовая шкала в Гц).

Отметим, что карты распределений ЛПАСМ для 2-го и 13-го интервалов анализа являются подобными. Сделаем следующий шаг в рассуждениях и попытаемся в среднем (на всем числе станций) проследить изменение ЛПАСМ во времени. На рис. 6 иллюстрируются фактическое наличие линейной зависимости ЛПАСМ от времени.

Вычисляя линейные регрессионные характеристики β_{1-7}^k и β_{7-13}^k для каждого пикета $k \in (1 \dots 43)$, путем решения систем линейных уравнений (3) и (4) на интервалах 1—7 и 7—13 мы получаем скорость изменения ЛПАСМ в каждой точке наблюдений и, интерполируя, карту на рис. 7.



$$\alpha_i^k = \beta_{1-7}^k \tau_i + d_{1-7}^k, \quad i = 1 \dots 7, \quad (6)$$

$$\alpha_i^k = \beta_{7-13}^k \tau_i + d_{7-13}^k, \quad i = 7 \dots 13. \quad (7)$$

Отметим, что сам факт гладкого распространения цветовой шкалы (значения β , без размерности), экспериментально подтверждает линейное убывание (и последующее возрастание) параметра α .

Вернемся к седьмому интервалу наблюдений (рис. 8). Рассматривая его как точку экстремума, мы в итоге получаем явно выделенную аномальную зону, рассчитанную с помощью ЛПАСМ и анализа изменения этого параметра во времени.

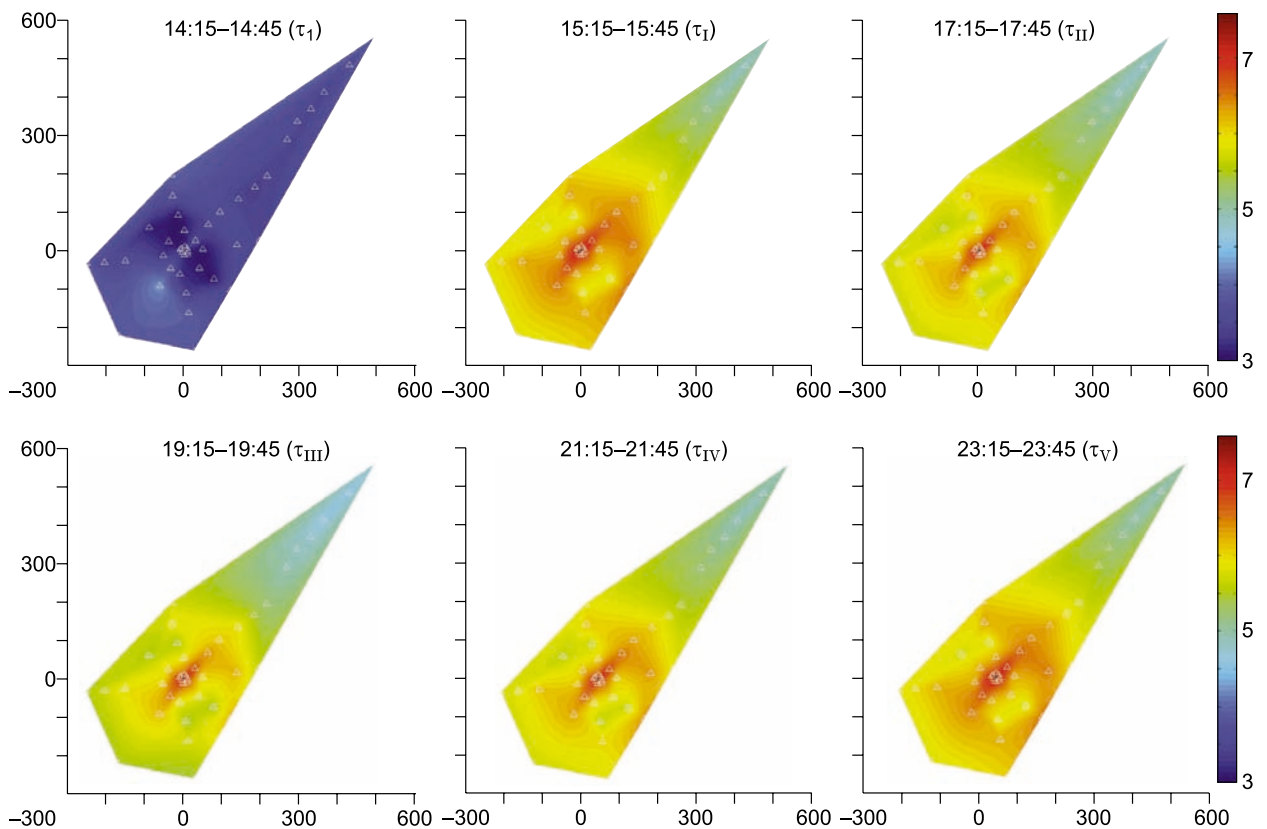


Рис. 10. Карты распределения оценки выделенной энергии на получасовых интервалах работы вибратора (цветовая шкала соответствует десятичному логарифму от суммарных амплитуд).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вначале проведем небольшое дополнительное исследование района эксперимента. Поскольку сейсмостанции были установлены до проведения сеансов работы вибратора, то на временном отрезке с 08:15, 08.07.2014 по 14:45, 08.07.2014 (время UTC) по значениям первых собственных частот на каждом пикете наблюдений (усреднялись 10-секундные спектры с расширением частотного диапазона) была построена карта резонансных частот района исследований (рис. 9) [Еманов и др., 2008].

Интересно, что в северо-восточном направлении собственная частота увеличивается (в сторону мыса, хорошо видного на рис. 1), а в районе расположения вибратора примерно соответствует резонансной частоте его платформы.

Далее полностью аналогично принципам построения графика, приведенного на рис. 2, были вычислены карты распределения оценки выделенной энергии для каждого из пяти сеансов работы вибратора (I—V), изображенные на рис. 10 (левая верхняя карта соответствует интервалу I, вибрационный источник выключен).

Обратим внимание, изображения на интервалах I и V весьма схожи, так же как и изображения для интервалов II и IV. Это неудивительно, поскольку режим работы вибратора на интервале I соответствовал режиму на интервале V (свипы), то же утверждение верно для интервалов II и IV (свипы).

Осредненное значение оценки выделенной энергии хорошо характеризует график на рис. 11.

Во время третьего (III) сеанса вибрационный источник работал в режиме монохроматического излучения. Более подробно режимы работы вибратора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика сеансов работы виброисточника

| Номер сеанса | Время | Тип сигнала | Частота, Гц | Длительность, мин |
|--------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------------|
| I | 15:00 | Свип | 7.9—11.2 | 47 |
| II | 17:00 | » | 6.25—9.5 | 47 |
| III | 19:00 | Монохром | 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5 | по 10 каждый |
| IV | 21:00 | Свип | 6.25—11.5 | 70 |
| V | 23:00 | » | 7.9—11.2 | 47 |

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции для пар наборов градиентов β^k

| Параметр | β_0^k | β_{1-7}^k | β_{7-13}^k |
|------------------|-------------|-----------------|------------------|
| β_0^k | 1 | 0.51 | 0.53 |
| β_{1-7}^k | 0.51 | 1 | 0.93 |
| β_{7-13}^k | 0.53 | 0.93 | 1 |

Можно, однако, говорить о том, что во время накачивания среды в районе эксперимента энергией станции фиксировали этот процесс довольно предсказуемо — количественная характеристика убывает экспоненциально в зависимости от расстояния до источника, некоторые артефакты на карте в ближней зоне вибратора могут быть объяснены неравномерностью системы наблюдений.

Таким образом, учитывая вышеприведенную информацию, можно с определенной уверенностью полагать, что распределение первых собственных частот колебаний в районе эксперимента (см. рис. 9) не оказывает заметного влияния на распределение ЛПАСМ и скорости его изменения во времени (см. рис. 7, 8). С другой стороны, мы не наблюдаем каких-то особенностей среды в зоне изучения, которые прослеживались бы во время сеансов вибрационного воздействия.

Наконец обратим внимание на то, как изменялась характеристика β , введенная в уравнениях (6), (7), до начала работы источника. В качестве контрольного промежутка времени был выбран период с 8:15 до 14:45 UTC для эксперимента, значения ЛПАСМ рассчитывались из системы линейных уравнений (2) для получасовых интервалов времени с шагом в один час. Диапазон частот соответствовал введенному ранее. Далее были вычислены значения градиента β_0^k для каждой станции. Карта распределений значений этих величин приведена на рис. 12 в единой цветовой шкале с рис. 7.

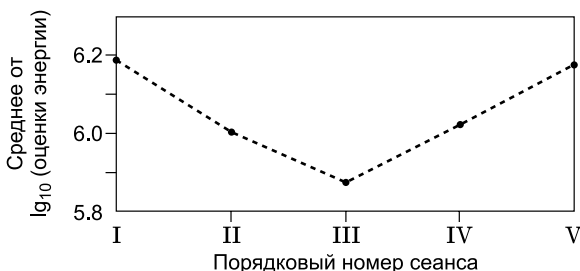


Рис. 11. Значение усредненных логарифмов оценки выделенной энергии в зависимости от номера сеанса работы вибратора.

Рис. 12. Распределение градиента ЛПАСМ до начала работы источника.

Поскольку карты на рис. 7 и 12 строились по данным с 43 точек наблюдений, можно оценить насколько они повторяют друг друга, построив матрицу корреляционных значений для трех наборов величин (табл. 2).

Можно заметить, что картина распределения градиента ЛПАСМ существенно изменяется после начала сеансов низкочастотных излучений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных, полученных с использованием мощного вибрационного источника, авторами установлено:

1. Десятичный логарифм оценки энергии, вычисленной по формуле (1) для каждой точки наблюдений и временного интервала, является линейной функцией от частоты (на ниспадающей ветви амплитудного спектра сигнала), и угол наклона этой линии (арктангенс введенного авторами параметра) последовательно возрастает в течение нескольких сеансов вибрационного воздействия и некоторое время после них, а затем возвращается к исходным значениям. Более того, процессы увеличения и последующего снижения угла наклона являются, в свою очередь, линейными по времени.

2. Свойство геологической среды отдавать (или накапливать) напряжения существенным образом изменяется при переходе от состояния покоя к режиму вибрационных нагрузок. Предполагается, что выделенная с помощью предложенного подхода аномальная зона характеризует способность грунта к высвобождению и последующему накоплению энергии под воздействием стационарного виброисточника.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев А.С., Геза Н.И., Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Манштейн А.К., Михайленко Б.Г., Селезнев В.С., Сердюков С.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Соловьев В.М., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 2004, 387 с.

Бережной Д.В., Биряльцев Е.В., Биряльцева Т.Е. Анализ спектральных характеристик микросейсм как метод изучения структуры геологической среды // Сб. НИИ математики и механики Казан. ун-та / Ред. А.М. Елизаров. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2008, с. 360—386.

Брыксин А.А., Селезнев В.С. Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (3), с. 399—405.

Брыксин А.А., Селезнев В.С., Сигонин П.А., Лисейкин А.В., Колесников Ю.И., Хогоев Е.А. Сравнение двух томографических методов при локализации гидроразрыва пласта // Геофизические методы исследования земной коры: материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8—13 декабря 2014 г.), Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2014, с. 109—111.

Графов Б.М., Арутюнов С.Л., Казаринов В.Е., Кузнецов О.Л., Сиротинский Ю.В., Сунцов А.Е. Анализ геоакустического излучения нефтегазовой залежи при использовании технологии АНЧАР // Геофизика, 1998, т. 5, с. 24—28.

Еманов А.Ф., Красников А.А., Бах А.А., Черных Е.Н., Еманов А.А., Семин А.В., Черепанов А.В. Резонансные свойства верхней части разреза // Физическая мезомеханика, 2008, т. 11, № 1, с. 26—36.

Колесников Ю.И., Хогоев Е.А., Селезнев В.С., Брыксин А.А. Сейсмоакустическая эмиссия в ближней зоне мощного вибрационного источника // Геофизические методы исследования земной коры: материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8—13 декабря 2014 г.), Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2014, с. 169—173.

Левин Б.В., Сасорова Е.В., Борисов С.А., Борисов А.С. Оценка параметров слабых землетрясений и их сигналов // Вулканология и сейсмология, 2010, № 3, с. 60—70.

