

МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI: 10.31429/vestnik-16-1-41-50

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ
НАБЛЮДЕНИЙ В ИССЛЕДОВАНИИ БЛОКОВЫХ СТРУКТУР
ЛИТОСФЕРЫ

Мухин А. С., Павлова А. В., Телятников И. С.

INTERPRETATION OF INSTRUMENTAL OBSERVATIONS RESULTS IN THE STUDY
OF BLOCK STRUCTURES OF THE LITHOSPHEREA. S. Mukhin¹, A. V. Pavlova¹, I. S. Telyatnikov²¹ Kuban State University, Krasnodar, Russia² Southern State University, Russian Academy of Science, Rostov-on-Don, Russia
e-mail: ilux_t@list.ru

Abstract. The paper presents the results of the instrumental observations processing, allowing to obtain information about the structure and interaction of the partings of heterogeneous fault-block geological environment. We have proposed a comprehensive method of active vibro-seismic monitoring that uses two types of signal: a signal with a linear frequency modulation (LFM) and a harmonic signal.

Previously, the authors presented the data of experiments on the excitation and recording of signals with linear frequency modulation, allowing to determine the absolute velocity of the longitudinal wave in a block geological environment. This paper is devoted to the description and analysis of the experimental data processing results using a harmonic signal generated by a mobile vibration source. The usage of a harmonic signal makes it possible to determine the transient response of the medium, the phase component of which in turn allows us to track the changes in velocity of the longitudinal wave from experiment to experiment.

In accordance with the general tasks of identifying the areas of conjugation of lithospheric structures, we analyzed the results of experiments using the complex method of vibro-seismic monitoring. The results of the data interpretation on geological and geophysical materials obtained using a heavy mobile vibro-seismic source give an idea of the local geological lithosphere structures, the localization of areas of dilatancy and the changes occurring in them.

Keywords: block element method, dilatant type structure identification, block lithospheric structures, complex vibromonitoring method, harmonic signal.

Введение

Проблема оценки напряженно-деформированного состояния литосферных структур является актуальной в геофизике, геомеханике и сейсмологии при моделировании геологических процессов и разработке методов мониторинга сейсмоопасных регионов. Данное обстоятельство определяет необходимость комплексного использования механико-математических методов и инструментальных геофизических наблюдений, проведения экспериментальных исследований и

моделирования на их основе напряженно-деформированного состояния геологической среды.

При реализации мониторинга сейсмического состояния региона особое место занимает изучение подготовки сейсмических событий. Учеными Кубанского государственного университета и Южного научного центра РАН развивается механическая концепция оценки сейсмичности [1–4 и др.], основу которой составляет анализ возможных сценариев разрушения структур литосферы у границ

Мухин Алексей Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Кубанского государственного университета; e-mail: muhin@mail.kubsu.ru.

Павлова Алла Владимировна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: pavlova@math.kubsu.ru.

Телятников Илья Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории математики и механики Южного научного центра РАН; e-mail: ilux_t@list.ru.

Отдельные части работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-01-00124, 18-05-80008).

разломов, в зонах контакта геологических отдельностей или локализации волновых и деформационных процессов внутренними дефектами. Совокупность положений теории «вирусов» вибропрочности [5] и метода блочного элемента [6] составляет эффективный математический аппарат, применимый для построения и исследования моделей участков земной коры и породных массивов с использованием данных инструментальных наблюдений [7, 8].

Напряженно-деформированное состояние неоднородной разломно-блоковой структуры геологической среды, зачастую содержащей дефекты типа трещин и включений на границах между блоками, определяет развивающиеся в ней геолого-геофизические процессы. Для построения адекватных моделей среды необходимо установить реальные параметры блоковой структуры. Последнее может быть обеспечено только использованием результатов экспериментальных исследований, данные которых могут оказаться весьма информативными.

В частности, для получения информации о структуре и взаимодействии отдельностей неоднородной разломно-блоковой геологической среды может быть использован комплексный метод активного вибросейсмического мониторинга, использующий два типа сигнала: сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и гармонический сигнал. При этом отклики обрабатываются соответственно корреляционным и спектральными методами.

В работе [8] описана постановка экспериментов по возбуждению и регистрации сигналов с линейной частотной модуляцией и обработка результатов. Эксперименты с ЛЧМ-сигналом позволяют определить абсолютную скорость продольной волны.

Настоящая работа посвящена описанию и анализу результатов обработки данных эксперимента с использованием гармонического сигнала, генерируемого передвижным виброисточником. Использование гармонического сигнала дает возможность определить переходную характеристику среды, фазовая составляющая которой в свою очередь позволяет отследить изменения скорости продольной волны от эксперимента к эксперименту.

В соответствии с общими задачами выявления зон сопряжения литосферных структур проанализированы результаты эксперимен-

тов с использованием комплексного метода вибросейсмического мониторинга.

1. Спектральный метод обработки данных эксперимента с использованием гармонического сигнала

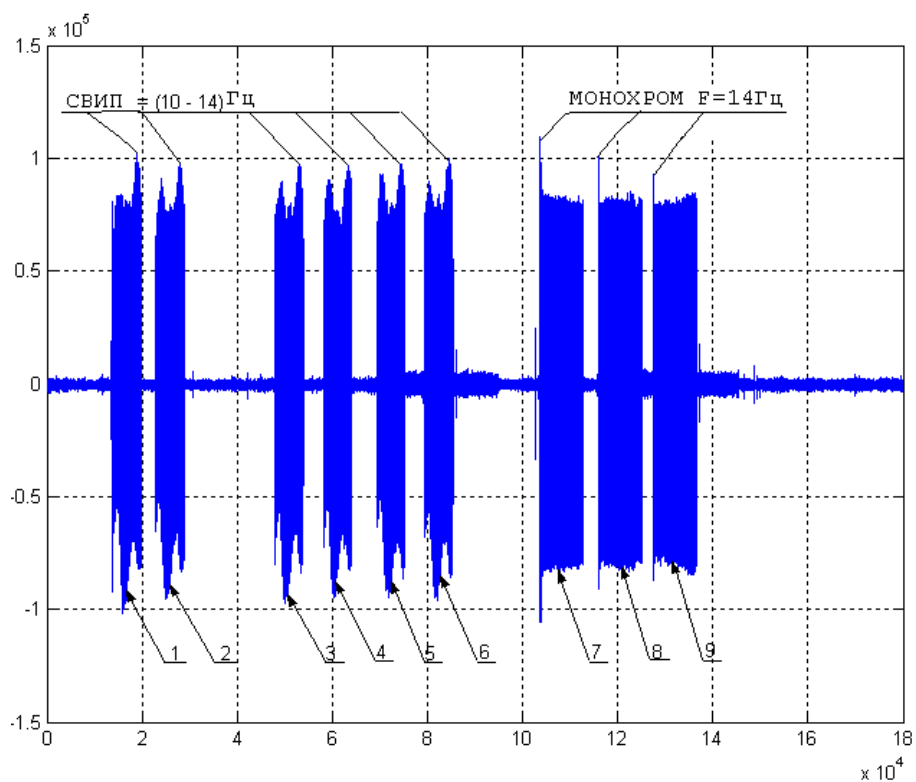
Методика эксперимента предполагает регистрацию излучаемого монохромного сигнала одновременно в ближней (50 м от вибратора) зоне и в удаленной точке. В данном эксперименте удаленная точка находилась на расстоянии 1,5 км. Для записи сигнала в ближней зоне использовался регистратор РСС-01 № 24, в дальней — регистратор РСС-01 № 22. Продолжительность каждого сеанса излучения составляла 180 с. На рис. 1а представлена запись регистратора РСС-01 № 24 вертикальной составляющей сигнала, цифры 7, 8, 9 соответствуют частоте 14 Гц.

Сеансы излучения монохромного сигнала имеют минутные перерывы, так как передвижной вибратор (модель У-3000) в режиме монохромного сигнала может работать непрерывно не более трех минут (180 с). Поэтому излучаемые в разные сеансы сигналы характеризуются случайным сдвигом фаз. Анализ показал, что для получения монохромного сигнала в удаленной точке без сдвига фазы в записи этого сигнала необходимо удалить два временных отсчета в перерыве между вторым и третьим сеансом излучения. Так, учитывая время начала записи сигналов № 22 и № 24 для устранения фазового сдвига между сеансами в сигнале № 22 удалялись отсчеты 126501 и 126502, спектр этого сигнала был рассчитан согласно [9]

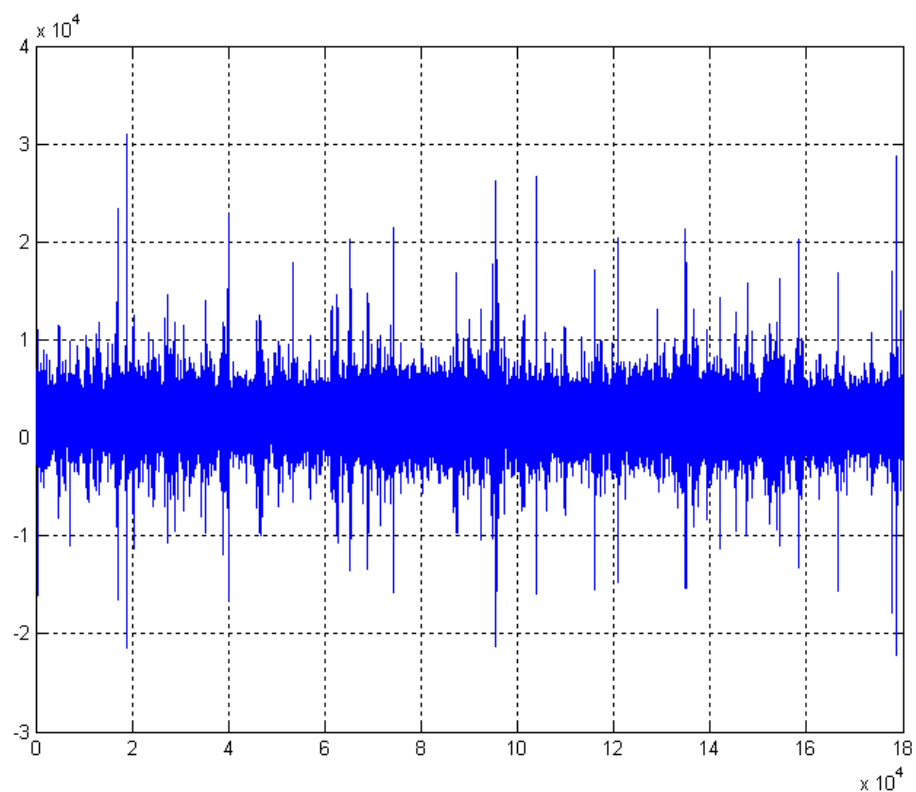
$$C_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp\left(-\frac{2i\pi nk}{N}\right).$$

Здесь n — номер спектральной составляющей; N — полное число отсчетов в оцифрованном сигнале; x_k — значение k -го отсчета в оцифрованном сигнале.

При расчете спектра сигнала учитывался лишь интервал записи работы вибратора в режиме монохромного излучения. Для определения начала этого интервала рассматривался участок сигнала № 24 (рис. 2), где номер первого отсчета в массиве сигнала — 103731, а помеченный квадратиком 38-й отсчет (под номером 103768 в массиве сигнала №24), соответствующий установившемуся



а)



б)

Рис. 1. а) Вертикальная составляющая сигнала № 24, записанного на расстоянии 50 м от источника; б) вертикальная составляющая сигнала № 22, записанного на расстоянии 1,5 км от источника [8]

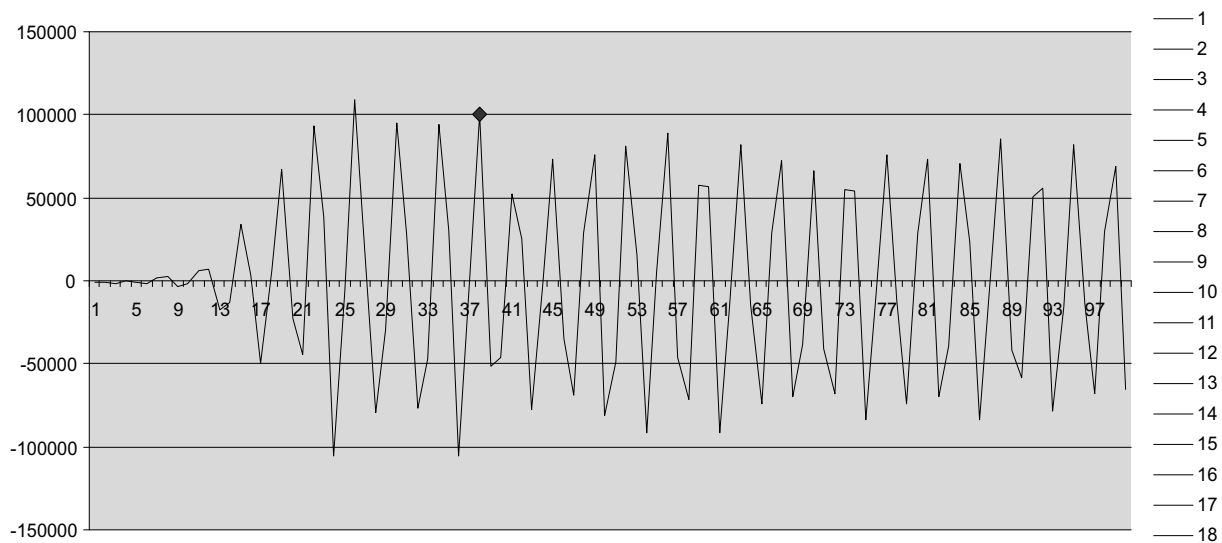


Рис. 2. Начало работы вибратора в режиме монохромного излучения 14 Гц, для сигнала № 24 (вертикальная составляющая), частота оцифровки 50 Гц

режиму работы вибратора и фазе синусоидального сигнала $\phi_{z22_1} = +4,83^\circ$, принят за начало работы вибратора в монохромном режиме.

Сигнал от источника достигает удаленного регистратора за 50 отсчетов (1 с). Для исключения из обработки участка становления, связанного с приходом различных волн в удаленную точку регистрации, начало смещается еще на 35 отсчетов, это обеспечивает обработку установившегося гармонического сигнала. Т.е. начало участка смещается на 85 отсчетов, что необходимо учитывать и в повторных экспериментах. Кроме того, следует учесть, что сигнал № 22 начал записываться на 24 с раньше, это соответствует 1200 отсчетам при частоте оцифровки 50 Гц. Таким образом, общее смещение начала обрабатываемого участка сигнала № 22 составляет 1285 отсчетов и соответствует номеру 105053 в массиве сигнала № 22.

В сигнале № 24 продолжительность монохромного излучения принята равной 31250 отсчетам (при построении спектра разрешение по частоте — 0,0016 Гц), а вместе с перерывами — 32800 отсчетам.

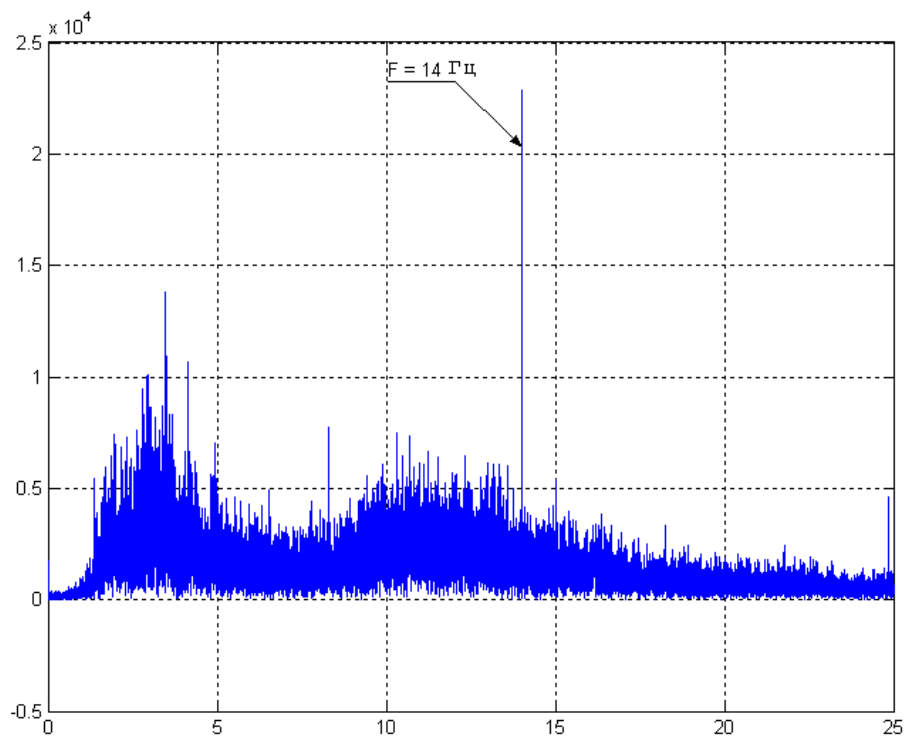
Вырезая из записи сигналов № 24 и № 22 участки, попадающие на первый нерабочий промежуток, и корректируя сдвиг фаз, получаем для обработки участок сигнала №22_1, содержащий отсчеты с 105053 по 136302 включительно. График спектра данного участка сигнала, принятого на расстоянии 1,5 км от

вибратора, представлен на рис. 3 (а), программа расчета написана языке MATLAB. Амплитуда спектральной составляющей сигнала №22_1 на частоте 14 Гц равна $A_{z22_1} = 23574$, фаза — $\phi_{z22_1} = -23,8^\circ$.

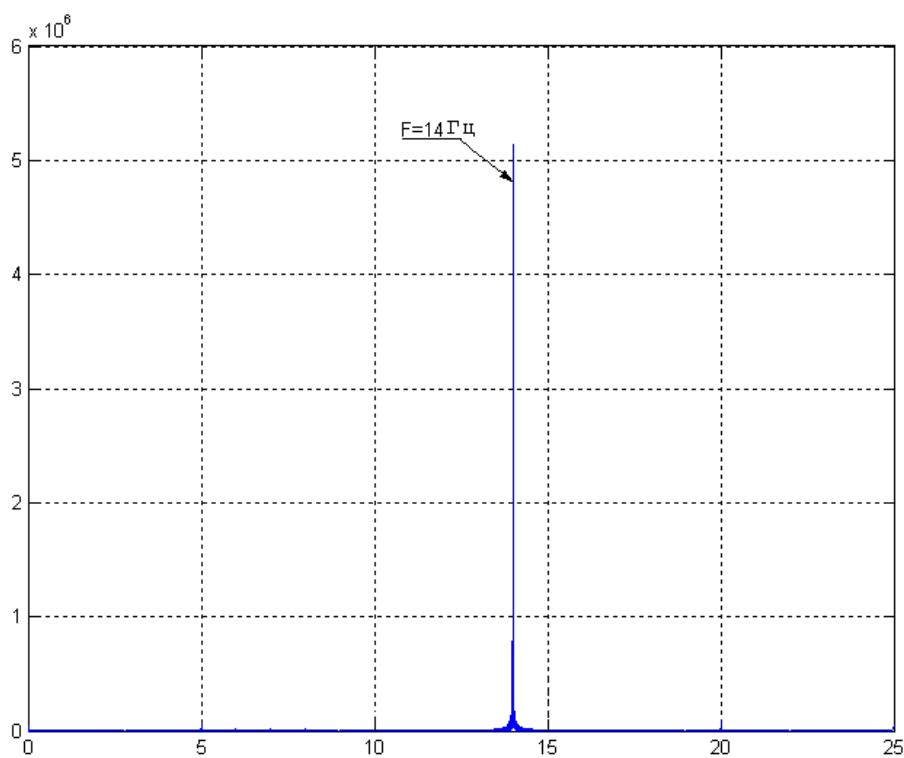
В отличие от корреляционного анализа, позволяющего определять абсолютное время прохождения сейсмической волны между двумя точками регистрации [8], использование спектрального анализа позволяет определять лишь относительное изменение времени прихода сейсмической волны в точку регистрации от одного измерения к другому. Комплексный метод вибромониторинга предполагает расчет переходной функции среды на частоте 14 Гц, т. е. определение соотношения комплексных спектральных линий возбуждаемого и зарегистрированного сигналов на данной частоте. На рис. 3б представлен рассчитанный в MATLAB спектр оцифрованной выборки сигнала в точке регистрации, отстоящей от вибратора на 50 м. Амплитуда спектральной составляющей сигнала на частоте 14 Гц равна $A_{z24_1} = 5516711$, фаза — $\phi_{z24_1} = +4,83^\circ$. Разность фаз зарегистрированных на разных расстояниях сигналов $\Delta\phi = \phi_{z22_1} - \phi_{z24_1} = -28,63^\circ$. Модуль переходной функции среды на частоте 14 Гц составляет

$$g = \frac{A_{z24_1}}{A_{z22_1}} = 234,02.$$

Величина изменения скорости сейсмической волны от одного эксперимента к другому



а)



б)

Рис. 3. а) спектр сигнала в удаленной точке приема (вертикальная составляющая), расстояние от вибратора 1,5 км; б) спектр сигнала (вертикальная составляющая), расстояние от вибратора 50 м

определяется по изменению фазы спектральной составляющей на частоте работы вибратора в режиме излучения гармонического сигнала. При этом определение характеристик микросейсмического шума на частоте излучения, который вносит основной вклад в погрешность измерения амплитуды и фазы гармонического сигнала в точке приема, позволит оценить величину погрешности измерения.

Из-за особенностей работы вибратора как крупногабаритной колебательной системы в спектре сигнала присутствуют помехи, обусловленные конструкцией и естественными ограничениями в системе поддержания заданной частоты, частота излучаемого сигнала претерпевает некоторые изменения относительно заданной, то есть излучается квазигармонический сигнал. Также следует учитывать, что микросейсмический шум при измерении амплитуды и фазы гармонического сигнала не является стационарным. Наблюдения за микросейсмическим шумом на сейсмостанции Кубанского государственного университета показали суточную периодичность уровня микросейсм с повышением в дневное время суток и понижением в ночное. Кроме того, уровень шума зависит от выбора точки измерения, состава и строения грунта, глубины установки датчиков, а также погодных условий, что влияет на погрешность измерения во время эксперимента, поэтому шум можно считать стационарным только в короткие интервалы времени. При постановке эксперимента необходимо учитывать, что спектральная плотность мощности (СПМ) шума является неравномерной в частотной области, следовательно, нужно выбирать диапазоны частот, в которых ее величина будет минимальна.

При наличии узкополосной помехи большой амплитуды вблизи измеряемой линии спектра увеличение ширины спектральной линии амплитуды влечет за собой усреднение близко расположенных спектральных линий. В работе [10] характеристики шума определяются по совокупности спектральных составляющих вне основной частоты зарегистрированного сигнала. Кроме сигнала на основной частоте, спектр сигнала в точке приема будет включать микросейсмический шум и шум сигнала

$$S_R(\omega_0 + \omega_k) = a(\omega_0 + \omega_k) + n(\omega_0 + \omega_k),$$

где $S_R(\omega_0 + \omega_k)$ — спектр регистрируемого сигнала вне спектральной линии основной частоты излучения; $a(\omega_0 + \omega_k)$ — спектр шума сигнала; $n(\omega_0 + \omega_k)$ — спектр микросейсмического шума.

Рис. 4 иллюстрирует спектр обработанного сигнала (№24_1) частотой 14 Гц, зарегистрированного на расстоянии 50 м, длительность сеанса — 625 с, спектральное разрешение — 0,0016 Гц.

Из рис. 4 видно, что вблизи основной частоты в области спектра шириной 0,02 Гц имеет место шум сигнала более $0,3 \times 10^6$, обусловленный наличием медленных малых вариаций амплитуды и фазы сигнала вибратора в течение сеанса. Колебания на этих частотах будут присутствовать и в точке регистрации с пропорциональной амплитудой, поэтому СПМ микросейсмического шума следует оценивать вне этой области [10].

На рис. 4б представлен спектр того же сигнала (частота 14 Гц), но зарегистрированного на расстоянии 1,5 км от вибратора. Несмотря на то, что в спектре присутствует и шум сигнала, дисперсия значений параметров гармонического вибросигнала и переходной функции среды на основной частоте зависит лишь от СПМ микросейсмического шума. СПМ микросейсмического шума $N(\omega_0)$ на частоте ω_0 можно оценить по спектру зарегистрированного сигнала как случайный процесс, так как он не коррелирует с шумом сигнала [10],

$$N(\omega_0) = \frac{1}{2P - M} \sum_{k=-P}^P \left(S_R^2(\omega_0 + \omega_k) - a^2(\omega_0 + \omega_k) \right), \quad (1.1)$$

где P — число линий спектра, M — число линий исключенных из спектра.

Эта оценка СПМ используется для определения дисперсии амплитуды и фазы гармонического вибросигнала. В формуле (1.1) для повышения точности определения погрешности при суммировании исключаются M линий спектральных составляющих шума сигнала, обусловленных конструкцией вибратора и естественными ограничениями в системе поддержания излучателем заданной частоты, исключаются также по 12 линий спектра справа и слева от основной частоты (14 Гц). В случае, если СПМ можно считать постоянной, дисперсия может быть рассчитана по известным

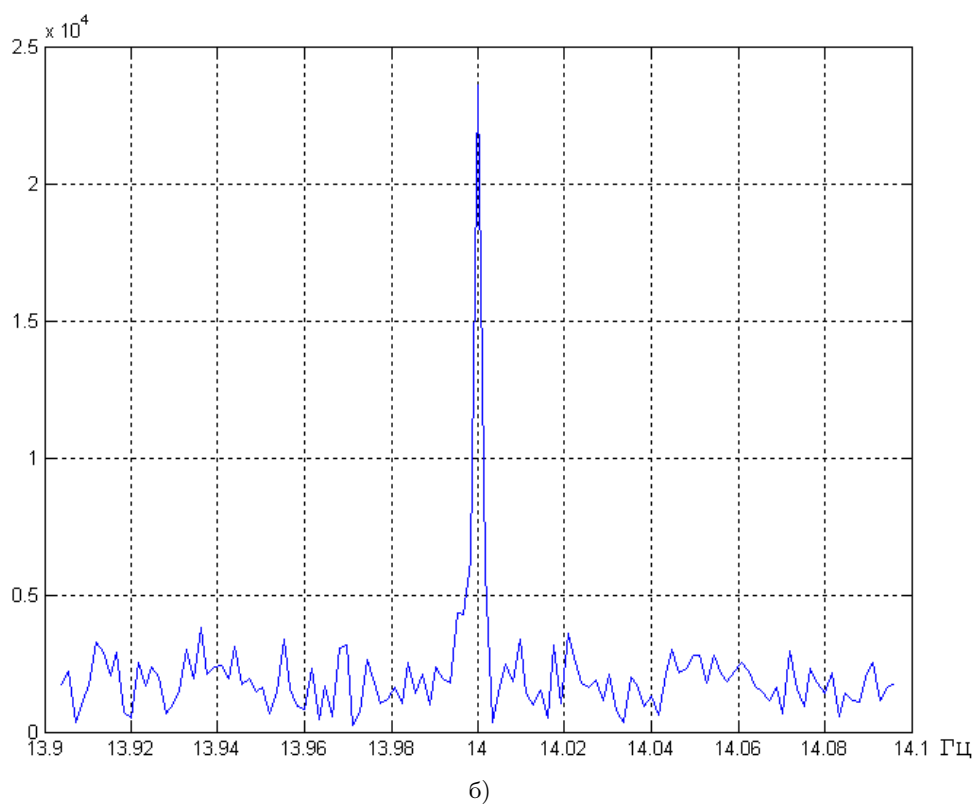
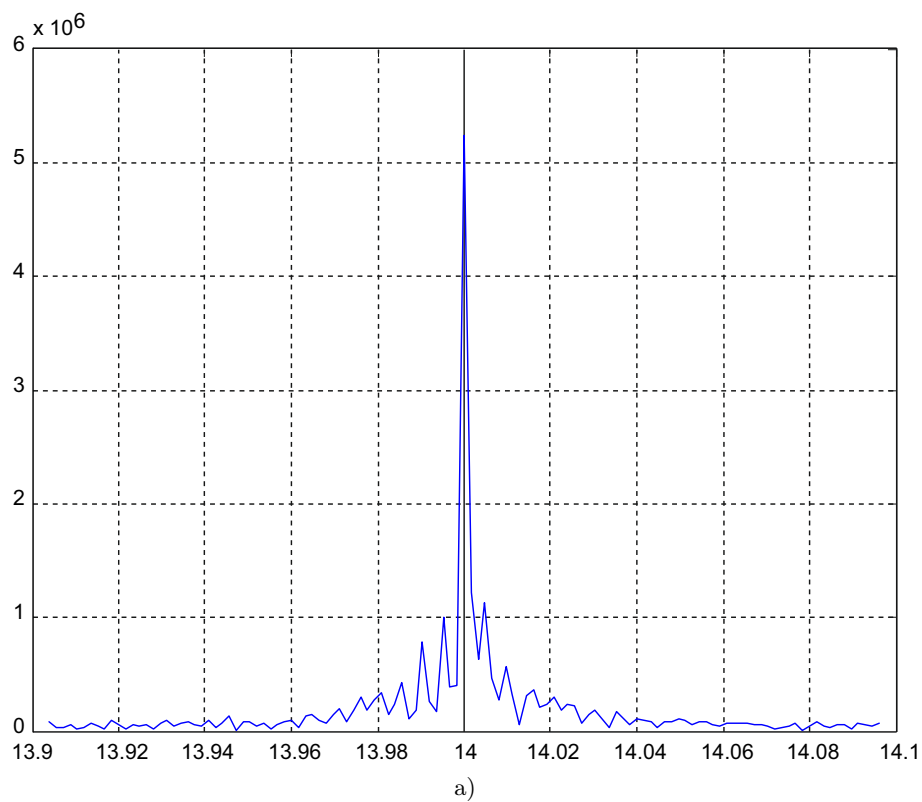


Рис. 4. а) Спектр сигнала (сигнал №24_1), 120 линий спектра; б) Спектр сигнала (сигнал №22_1), 120 линий спектра

формулам [10]. Для больших значений отношения сигнал/шум можно воспользоваться следующей асимптотической оценкой:

$$\begin{aligned} \langle A \rangle &\approx A \left(1 + \frac{N(\omega_0)}{TA^2} \right), \\ \sigma_A^2 &= \frac{N(\omega_0)}{T}, \\ \langle \varphi \rangle &= \varphi, \quad \sigma_\varphi^2 = \frac{N(\omega_0)}{TA^2}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Здесь A , φ — амплитуда спектральной составляющей на частоте 14 Гц и фаза; $\langle A \rangle$, $\langle \varphi \rangle$ — математическое ожидание амплитуды и фазы зарегистрированного сигнала соответственно; σ_A^2 , σ_φ^2 — дисперсия оценок амплитуды и фазы соответственно; T — продолжительность сеанса. Для малых значений отношения сигнал/шум формулы существенно усложняются.

Из (1.2) получим следующие оценки измеренных сигналов и погрешности. Для обработанного сигнала (№22_1, частота 14 Гц), зарегистрированного на расстоянии 1,5 км от вибратора: $\langle A_{22_1} \rangle = 23574$ отсчетов аналогоцифрового преобразователя (АЦП), $\langle \varphi_{22_1} \rangle = -23,8^\circ$. Предельная погрешность вычисляется с помощью задаваемых доверительной вероятности и среднеквадратического отклонения (1.2). Так, для доверительной вероятности 0,9973 [11], доверительный интервал для оценки амплитуды сигнала (№22_1, частота 14 Гц) $\pm \Delta_{A_{22_1}} = \pm 3 \times \sigma_{A_{22_1}} = \pm 236$ отсчетов АЦП. В процентном выражении погрешность составляет 1% от величины амплитуды. Аналогично для оценки фазы зарегистрированного сигнала при той же доверительной вероятности $\pm \Delta_{\varphi_{22_1}} = \pm 3 \times \sigma_{\varphi_{22_1}} = \pm 0,5739^\circ$.

Математические ожидания амплитуды и фазы сигнала, зарегистрированного на расстоянии 50 м от вибратора (сигнал №24_1, частота 14 Гц), можно оценить следующим образом: $\langle A_{24_1} \rangle = 5516711$ отсчетов АЦП, $\langle \varphi_{24_1} \rangle = +4,83^\circ$. Предельную погрешность можно определить аналогично описанному выше: $\pm \Delta_{A_{24_1}} = \pm 3 \times \sigma_{A_{24_1}} = \pm 11396$ отсчетов АЦП, что составляет 0,2 % от величины амплитуды, $\pm \Delta_{\varphi_{24_1}} = \pm 3 \times \sigma_{\varphi_{24_1}} = \pm 0,1184^\circ$.

Разность фаз сигналов, зарегистрированных на расстоянии 50 м и 1,5 км от вибратора, равна $\varphi_{22_1} - \varphi_{24_1} = -28,63^\circ$.

В силу того, что погрешности измерения фаз статистически независимы, доверительный интервал для оценки разности фаз при

доверительной вероятности 0,9973 можно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} \pm \Delta_{\varphi_{22_1} - \varphi_{24_1}} &= \pm \sqrt{\Delta_{\varphi_{22_1}}^2 + \Delta_{\varphi_{24_1}}^2} = \\ &= 86 \approx \pm 0,6^\circ. \end{aligned}$$

Время прихода к приемнику сейсмической волны находится в прямо пропорциональной зависимости от фазы зарегистрированного сигнала. Для рассмотренного эксперимента чувствительность к измерению фазы ограничивается погрешностью $\pm 0,6^\circ$, откуда можно заключить, что при одинаковых условиях эксперимента оценка погрешности относительных вариаций скорости сейсмических волн V_P составляет $\delta V_P / V_P = 1,3 \cdot 10^{-4} = 0,013\%$.

Известно [12], что в дилатантных областях изменение скорости продольных волн может достигать 5 %. Следует учитывать, что, анализируя зарегистрированный сигнал на расстоянии 1,5 км от источника, можно обнаружить только приповерхностную дилатантную область. Для анализа заглубленных структур необходимо существенно увеличивать длину трассы, что неизменно приведет к уменьшению значения соотношения сигнал/шум в точке приема сигнала, тем самым чувствительность метода уменьшится, а погрешность измерения возрастет. Для предотвращения подобных последствий необходимо увеличивать энергию излучаемого гармонического сигнала, чего можно достигнуть увеличением длительности его излучения, так как часто невозможно увеличить амплитуду. Кроме того, необходимо выбрать частоту излучения в диапазоне с наименьшим шумом и соответствующий временной интервал суток.

Заключение

При моделировании региональной сейсмичности для практического применения метода блочного элемента необходимо изучить геологические особенности среды региона, определив параметры блоковой структуры, т.е. размеры ее составляющих, их физико-механические свойства, а также условия сцепления блоков. В работе представлен метод обработки экспериментальных данных, составляющий вместе с описанным в [8] так называемый комплексный метод, применимый для идентификации структур дилатантного типа. При этом взаимодействие отдельных локальных геологических образований дилатантно-

го типа обычно связывается с взаимодействиями отдельностей неоднородной разломно-блоковой геологической среды [13, 14].

Таким образом, комплексный метод можно использовать для выявления зон зацепления блоков и описания граничных условия их сопряжении при создании моделей геологических структур региона. Результаты интерпретации данных о геолого-геофизических материалах, полученных с использованием тяжелого передвижного вибросейсмоисточника, дают представление о локальных геологических структурах и локализации областей дилатансии и происходящих в них изменениях.

Литература

1. *Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.* К проблеме физико-механического предвестника стартового землетрясения: место, время, интенсивность // ДАН. 2016. Т. 466. № 6. С. 664–669.
2. *Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M.* Hidden defects in nanostructures, covering bodies, and seismology // *Doklady Physics*. 2014. Vol. 59, Iss. 7. P. 313–317.
3. *Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В., Зарецкая М.В., Павлова А.В., Уафа С.Б., Шестопалов В.Л.* О мониторинге состояния параллельных штолен в зоне горизонтального движения литосферных плит // Известия РАН. Механика твердого тела. 2017. № 4. С. 42–49.
4. *Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В., Мухин А.С., Федоренко А.Г., Шестопалов В.Л.* К проблеме медленных сейсмических волн // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2012. № 6. С. 37–43.
5. *Бабешко В.А.* «Вирусы» вибропрочности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. 1994. Спецвыпуск. №1. С. 90–91.
6. *Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В.* К теории блочного элемента // Доклады АН. 2009. Т. 427. №2. С. 183–187.
7. *Мухин А.С., Павлова А.В., Телятников И.С.* К методам исследования блочных литосферных структур // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017, №1. С. 65–73.
8. *Мухин А.С., Павлова А.В., Телятников И.С.* К моделям и экспериментальным методам исследования блоковых структур литосферы // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2018. № 1. С. 29–36.
9. *Ворович И.И., Александров В.М., Бабешко В.А.* Неклассические смешанные задачи теории упругости. М.: Наука, 1974. 456 с.
10. *Ковалевский В.В., Пушиной Б.М., Салаватов Р.М.* Оценка погрешности измерения вибросейсмических сигналов // Труды ВЦ СО РАН. Серия Математическое моделирование в геофизике. 1996. Вып. 4. С. 80–93.
11. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1989. 656 с.
12. *Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д., Захаров В.С., Лутиков А.И., Славина Л.Б., Рейснер Г.И., Овсяченко А.Н., Юнга С.Л., Новиков С.С.* Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений — основа реального сейсмического прогноза. М.: Светоч Плюс, 2011. 368 с.
13. *Собисевич А.Л.* Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Северокавказская геофизическая обсерватория ИФЗ РАН. (Создание, результаты наблюдений). М.: ИФЗ РАН, 2012. 510 с.
14. *Николаевский В.Н.* Обзор: Земная кора дилатансия и землетрясения. М.: Мир, 1982. С. 133–202.

References

1. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. K probleme fiziko-mehaničeskogo predvestnika startovogo zemletrjasenija: mesto, vremja, intensivnost' [To the problem of the physico-mechanical forerunner of the initial earthquake: place, time, intensity]. *Reports of Academy of Sciences*, 2016, vol. 466, iss. 6, pp. 664–669. (In Russian)
2. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Hidden defects in nanostructures, covering bodies, and seismology. *Doklady Physics*, 2014, vol. 59, iss. 7, pp. 313–317.
3. Babeshko V.A., Babeshko O.M., Evdokimova O.V., Zareckaya M.V., Pavlova A.V., Uafa S.B., Shestopalov V.L. O monitoringe sostoyaniya parallel'nyh shtolen v zone gorizontalnogo dvizheniya litosfernyh плит [On monitoring the state of parallel galleries in the zone of horizontal movement of lithospheric plates]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Proc. of the RAS. Solid mechanics], 2017, no. 4, pp. 42–49. (In Russian)
4. Babeshko V.A., Babeshko O.M., Evdokimova O.V., Mulin A.S., Fedorenko A.G., Shestopalov V.L. K probleme medlennyh sejsmicheskikh voln [To the problem of slow seismic waves]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Proc. of the RAS. Solid mechanics]. 2012, no. 6, pp. 37–43. (In Russian)
5. Babeshko V.A. "Viruses" vibroprochnosti ["Viruses" vibration strength]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region* [News of higher educa-

- tional institutions], 1994, no. 1, pp. 90–91. (In Russian)
6. Babeshko V.A., Babeshko O.M., Evdokimova O.V. K teorii blochnogo ehlementa [To the theory of block element]. *Reports of Academy of Sciences*, 2009, vol. 427, no. 2, pp. 183–187. (In Russian)
 7. Mulin A.S., Pavlova A.V., Telyatnikov I.S. K metodam issledovaniya blochnyh litosfernyh struktur [To research methods of block lithospheric structures]. *Ekologicheskij vestnik nauchnyh centrov Chernomorskogo ehkonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2017, no. 1, pp. 65–73. (In Russian)
 8. Mulin A.S., Pavlova A.V., Telyatnikov I.S. K modelyam i ehksperimental'nyim metodam issledovaniya blokovyh struktur litosfery [To models and experimental methods for the study of block structures of the lithosphere]. *Ekologicheskij vestnik nauchnyh centrov Chernomorskogo ehkonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2018, no. 1, pp. 29–36. (In Russian)
 9. Vorovich I.I., Aleksandrov V.M., Babeshko V.A. *Neklassicheskie smeshannye zadachi teorii uprugosti* [Non-classical mixed problems of the theory of elasticity]. Nauka, Moscow, 1974. (In Russian)
 10. Kovalevskij V.V, Pushnoj B.M., Salavatov R.M. Ocenka pogreshnosti izmereniya vibrosejsmicheskikh signalov [Estimation of vibration measurement errors. *Trudy VC SO RAN. Seriya. Matematicheskoe Modelirovanie v geofizike* [Proc. of the CC SB RAS. Series Mathematical Modeling in Geophysics], 1996, vol. 4, pp. 80–93. (In Russian)
 11. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical foundations of statistical radio engineering]. Sovetskoe radio, Moscow, 1989. (In Russian)
 12. Rogozhin E.A., Ioganson L.I., Zav'yalov A.D., Zaharov V.S., Lutikov A.I., Slavina L.B., Rejsner G.I., Ovsyuchenko A.N., Yunga S.L., Novikov S.S. *Potencial'nye sejsmicheskie ochagi i sejsmologicheskie predvestniki zemletryasenij – osnova real'nogo sejsmicheskogo prognoza* [Potential seismic foci and seismological precursors of earthquakes are the basis of a real seismic forecast]. Svetoch Plyus, Moscow, 2011. (In Russian)
 13. Sobisevich A.L. *Izbrannye zadachi matematicheskoi geofiziki vulkanologii i geoekologii T. 2 Severokavkazskaia geofizicheskaja observatoriia IFZ RAN Sozdanie rezultaty nabludenii* [Selected problems of mathematical geophysics, volcanology and geoecology. Vol. 2. North Caucasus Geophysical Observatory, IPB RAS. (Creation, results of observations). IPE RAS, Moscow, 2012. (In Russian)
 14. Nikolaevskii V.N. *Obzor: Zemnaia kora dilatatsiia i zemletriaseniia* [Review: Earth crust dilatancy and earthquakes]. Mir, Moscow, 1982. (In Russian)