

МЕХАНИКА

УДК 539.3

К МОДЕЛЯМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДАМ
ИССЛЕДОВАНИЯ БЛОКОВЫХ СТРУКТУР ЛИТОСФЕРЫ

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

TO MODELS AND EXPERIMENTAL METHODS FOR STUDYING THE BLOCK
STRUCTURES OF THE LITHOSPHEREMukhin A. S.¹, Pavlova A. V.¹, Telyatnikov I. S.²¹ Kuban State University, Krasnodar, Russia² Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

e-mail: kmm@fpm.kubsu.ru

Abstract. The development of reliable methods for identifying the structure of lithospheric plates (determining the structural boundaries of elements and the type of contact in their conjugation areas) contributes to the development of a mathematical apparatus for studying the stress-strain state of lithospheric structures. The block-element method is an effective mathematical tool for studying the generation and propagation of slow seismic interactions, which makes possible the construction of basic equations describing processes in a different-sized block medium. The algorithm for solving boundary-value problems for such media becomes greatly simplified with usage the block-element method that combines factorization methods with a topological approach.

But for the construction of adequate lithospheric structure models on a regional scale, it is necessary to determine the conjugation parameters of the blocks affecting the propagation of seismic interactions. Within the concept of block divisibility of the lithosphere, the focal zone for the preparation of an earthquake is formed in the block conjugation area, the so-called meshing. The paper focuses on one of the approaches, which is based on the processing of experimental data, obtained using a mobile vibration source, and is part of the so-called complex method, applicable for identification of environmental properties, zones of block connection during their tectonic interaction and fault diagnostics. We describe the method for determining the velocity of a longitudinal wave using the emitted signal with linear frequency modulation (LFM) as a result of the application of correlation method.

Based on the presented experimental studies and the results processing, it is concluded that the method for estimating the velocity characteristics of a medium using a LFM-signal can be used for the assessment of the changes in the stress-strain state of a geological medium as one of the components of a complex method. The above method together with the spectral analysis of harmonic (monochrome) signals makes it possible to determine the properties of the medium and to reveal the locations of the meshing zones in the block structure and to describe the boundary conditions when the blocks are conjugated, which is important for creating models of the earth's crust sections and rock massifs in the process of studying regional seismicity.

Keywords: block lithospheric structures, block-element method, experimental studies using a seismic vibration source, identification of properties of the geological environment, a signal with linear frequency modulation, correlation method.

Введение

При разработке моделей геологических процессов особое место занимает изучение подготовки сейсмических событий. Ученые

Кубанского государственного университета и Федерального исследовательского центра Южный научный центр Российской академии наук активно развивают механическую концепцию оценки сейсмичности, в основе ко-

Мухин Алексей Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник НИЦ ПГК 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.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (18-01-00124) и Администрации Краснодарского края (16-41-230184 p_a).

торой лежит анализ возможных механизмов и сценариев разрушения структур литосферы у границ разломов или в зонах контакта плит. Данная концепция служит базой развитию теории и методов прогноза нарастания региональной сейсмичности, в частности, методов расчета напряженно-деформированного состояния упругой среды (слоистой, слоисто-блочной, в том числе при наличии дефектов на межблочных границах), моделирующей литосферные структуры, в условиях вибрационных воздействий. При этом сейсмический режим рассматривается как развитие в земной коре деформационного процесса, а отдельные коровые структуры — как деформируемые твердые тела с неоднородностями.

Метод блочного элемента — один из эффективных подходов к исследованию смешанных динамических задач. Фактором, стимулирующим его применение, является значительный прогресс, достигнутый в разработке экспериментальных методов изучения процессов распространения волновых и деформационных полей в средах со сложными свойствами, данные которых могут быть использованы при построении адекватных математических моделей. Стремительное развитие технологий и наблюдательной инструментальной базы сейсмологии значительно увеличивает объем регистрируемых данных о происходящих изменениях в Земной коре. Разработка надежных методов идентификации строения литосферных плит (определения структурных границ элементов и типа контакта в областях их сопряжения) в свою очередь способствует развитию математического аппарата для исследования напряженно-деформированного состояния структур литосферы с учетом сложного строения геологической среды.

Посылаемые от источников до удалённых приёмников вибросейсмические сигналы в значительной степени трансформируются из-за сложного строения литосферных плит (наличия дефектов типа включений, разломов различных размерностей) [1]. Для исследования напряженного состояния слоистых структур определяют скорости прохождения продольных, поперечных, поверхностных, рефрагированных волн, теория распространения которых в слоистых средах достаточно хорошо разработана [2, 3 и др.], для таких сред известны результаты многочисленных экспериментов, связанных с возбуждением и приёмом различных типов волн. Но ука-

занных данных оказывается недостаточно в тех случаях, когда литосферные плиты имеют сложную блочную структуру [4]. Работа посвящена исследованию сейсмических сигналов широкого спектра частот в пункте приема в течение заданного времени после возмущения исследуемой блочно-структурированной среды с разломами естественным или искусственным источником.

Проводимые с помощью различных аппаратурных средств исследования напряженно-деформированного состояния земной коры в сейсмоопасных регионах позволяют предположить существование распространяющихся в коре Земли медленных сейсмических волн, являющихся причиной так называемого «сейсмического дальнего действия», проявляющегося в реагировании приборов, даже в значительно удаленных от эпицентров землетрясений зонах, на изменение сейсмической обстановки перед событием. Основанием для подобных предположений являются показания высокоточных GPS/ГЛОНАСС приемников [5], приборов, отслеживающих уровень изолированных вод в гидрогеологических скважинах [6], наклономеров [7].

В работе описан один из подходов, основанный на обработке данных экспериментов, проведенных с использованием передвижного виброисточника.

1. Метод блочного элемента

Математический аппарат для изучения генерации и распространения медленных сейсмических взаимодействий должен предоставлять возможность построения основных уравнений, описывающих процессы в разноразмерной блочной среде. Алгоритм решения краевых задач для блочных структур существенно упрощается при использовании метода блочного элемента, объединяющего факторизационные методы с топологическим подходом. Согласно идее метода блочного элемента система составляющих блочной структуры рассматривается как покрытие топологического пространства, что позволяет осуществить сопряжение самих блоков и вектор-функций на блоках-носителях посредством топологической склейки [8, 9].

Пусть занимаемая всей блочной структурой область Ω разбита на выпуклые подобласти Ω_l с границами $\partial\Omega_l$ ($l = 1, \bar{L}$). Применительно к общей граничной задаче, описывающей взаимодействие L фрагментов разнотип-

ных блоков [8–10], алгоритм метода приводит к системе функциональных уравнений в матричной форме

$$\mathbf{K}_l(\boldsymbol{\alpha}^\nu) \boldsymbol{\Phi}_l(\boldsymbol{\alpha}^\nu) = \iint_{\partial\Omega_l} \boldsymbol{\omega}_l^\nu - \mathbf{G}_l(\boldsymbol{\alpha}^\nu),$$

$$\boldsymbol{\Phi}_l(\boldsymbol{\alpha}^\nu) = V_3 \mathbf{u}_l^\nu,$$

где матрица-функция $\mathbf{K}_l(\boldsymbol{\alpha}^\nu) = \|k_{lm}(\boldsymbol{\alpha}^\nu)\|$ — полиномиальная, $\boldsymbol{\alpha}^\nu = \{\alpha_i^\nu\}$ ($i = \overline{1,3}$) имеет порядок P в ν -й локальной системе координат, $\boldsymbol{\Phi}_l = V_3 \boldsymbol{\phi}_l$, $\mathbf{G}_l = V_3 \mathbf{g}_l$, V_3 — оператор трехмерного интегрального преобразования Фурье, отыскиваемое решение $\boldsymbol{\phi}_l(\mathbf{x}) = \{\phi_{il}\}$, заданные вектор-функции \mathbf{g}_l , принадлежащие некоторому пространству медленно растущих функций $\mathbf{H}_s(\Omega)$. Компонентами вектора внешних форм $\boldsymbol{\omega}_l^\nu$ являются значения на границе $\partial\Omega_l$ искомого решения $\boldsymbol{\phi}$, а также его нормальных производных (как неизвестных, так и описываемых граничными условиями на внешних границах и границах контакта блоков $\partial\Omega_l \cap \partial\Omega_m$, $l, m = \overline{1, L}$),

$$(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}) = \sum_{k=1}^3 x_k \alpha_k.$$

Случай разноразмерной блочной структуры, описывающий, например, двумерные пластины с разломами на поверхности трехмерного основания [5], представляет самостоятельный интерес. В работе [11] метод блочно-го элемента применялся к задаче для упругих сред с покрытиями, на основе теории скрытых дефектов исследовалась возможность возникновения стартовых землетрясений при воздействии на лежащие на деформируемом основании литосферные плиты.

Однако практическое применение указанного метода для моделирования региональной сейсмичности требует определения истинных параметров блоковой структуры региона, т.е. размеров ее составляющих, их физико-механических свойств, а также условий сцепления блоков. Эта проблема может быть решена только с привлечением экспериментальных методов.

2. Экспериментальные исследования литосферных структур с использованием передвижного вибр Сейсмического источника

Для построения адекватных моделей литосферных структур в масштабе региона необ-

ходимо определить влияющие на распространение медленных сейсмических взаимодействий параметры сопряжения блоков. В рамках концепции блоковой делимости литосферы очаговая зона подготовки землетрясения формируется в области сопряжения блоков литосферной структуры, так называемого зацепления. Исходя из этого, основными целями проводившихся в КубГУ экспериментов с использованием передвижного вибр Сейсмического источника были: измерение скорости продольной волны при использовании излучаемого сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ); определение амплитуды и фазы сигналов на входе и выходе при работе с гармоническим сигналом с использованием спектрального метода; определение переходной характеристики сред; оценка чувствительности метода к изменению скорости продольной волны в исследуемой среде с помощью излучаемых сигналов: гармонического и ЛЧМ-сигнала; обоснование вывода о возможности обнаружения зон сопряжения блоков с помощью комплексного метода. В настоящей работе представлено описание методики определения скорости продольной волны при использовании излучаемого сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Комплексный метод состоит в следующем: для получения интересующих оценок используются два типа сигнала, отклики обрабатываются двумя методами — корреляционным и спектральным. Используя ЛЧМ-сигнал, определяется абсолютная скорость продольной волны, исходя из расчета задержки приема сигнала вибратора удаленным на заданное расстояние регистратором от времени прихода сигнала к регистратору, находящемуся в непосредственной близости от источника. Используя гармонический сигнал, получается переходная характеристика среды, фазовая составляющая которой позволяет определять изменения скорости продольной волны от эксперимента к эксперименту. На основании рассчитанной абсолютной скорости и погрешности измерения фазовой характеристики можно определить чувствительность метода к изменению скорости продольной волны во времени. В эксперименте 2009 г. использовалась следующая измерительная аппаратура: тяжелый передвижной вибратор Y-3000, два оснащенных GPS-приемниками регистратора сейсмических сигналов РСС-01 и два откалиброванных [12] трехкомпонентных сейсмодат-

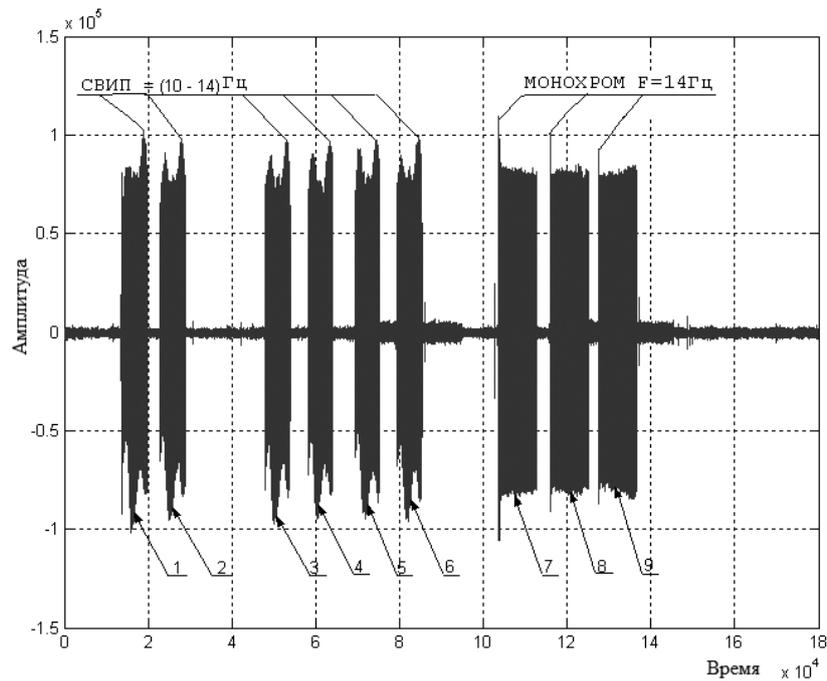


Рис. 1. Вертикальная составляющая сигнала 24, записанного на расстоянии 50 м от источника

чика СМЕ-1003. Проводилась регистрация сигнала вибратора в двух точках — на расстоянии 1,5 км в восточном направлении от источника (регистратор РСС-01 №22) и в непосредственной близости от него (регистратор РСС-01 №24), на расстоянии 50 м. Вибратор, располагавшийся на территории Кубанского госуниверситета, с небольшими временными интервалами последовательно генерировал три монохромных сигнала и шесть СВИП-сигналов. Монохромные сигналы имели частоту 14 Гц, в СВИП-сигналах в течение 120 секунд частота изменялась линейно от 10 до 14 Гц.

Вертикальная составляющая колебаний сейсмодатчика (расстояние от источника 50 м) для сигнала, записанного регистратором РСС-01 №24, приведена на рис. 1. Начало записи сигнала с использованием приемника GPS — 12 часов 58 минут 7 секунд, точность начала записи — 10 мкс, длина сигнала — 179900 отсчетов, частота оцифровки — $F_d = 50$ Гц. Далее для краткости описанный сигнал называется сигнал 24.

Каждому участку увеличения амплитуды (1–5) соответствуют работа вибратора в режиме излучения СВИП-сигнала.

Рис. 2 иллюстрирует изменение вертикальной составляющей записанного на расстоянии 1,5 км регистратором РСС-001 № 22 сигнала (далее — сигнала 22). Начало записи с использованием приемника GPS — 12 часов 57 минут 43 секунды, точность начала записи — 10 мкс, длина сигнала — 179998 отсчетов, $F_d = 50$ Гц.

При обработке зарегистрированной информации были использованы два метода: корреляционного и спектрального анализа. В результате применения первого проведено сравнение во времени двух функций — автокорреляционной функции (АКФ) для сигнала 24 и взаимокорреляционной функции (ВКФ) двух сигналов (24 и 22).

Для оцифрованного сигнала АКФ определяется формулой [10]

$$B_u(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u(t - \tau) dt, \quad (2.1)$$

где $u(t)$ и $u(t - \tau)$ — описывают сигнал и его копию, смещенную во времени.

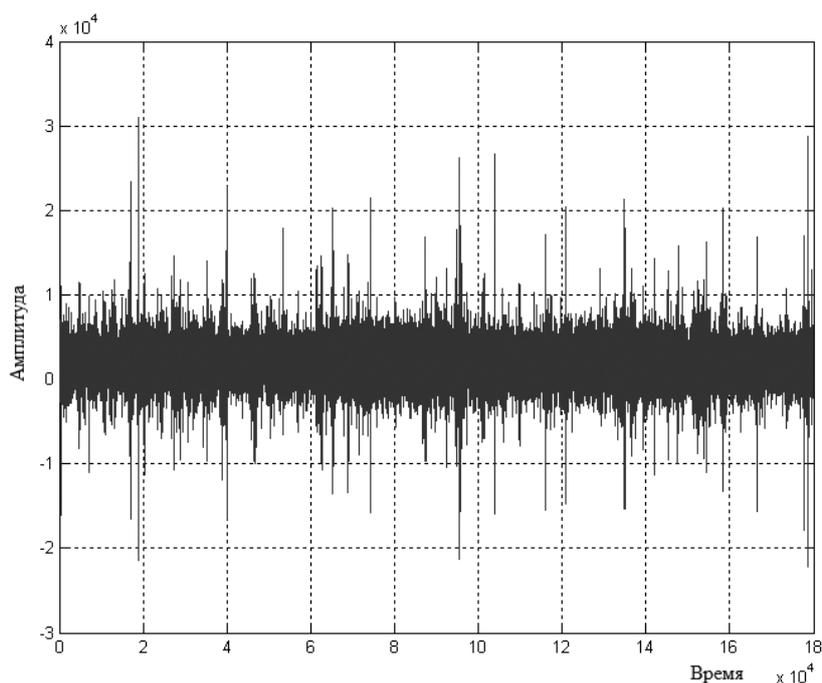


Рис. 2. Вертикальная составляющая сигнала (№ 22), записанного на расстоянии 1,5 км от источника

Формула расчета АКФ для оцифрованного сигнала [10] имеет вид

$$B_u(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u_j u_{j-n}, \quad (2.2)$$

где u_j — исследуемый сигнал, представленный в качестве совокупности оцифрованных отсчетов; u_{j-n} — сдвинутый на n отсчетов сигнал, $n \in Z$.

Бесконечные пределы суммирования заменяют на определяемые интервалом времени, где $u_j u_{j-n} \neq 0$, конечные. Расчет ВКФ и АКФ реализован в среде MATLAB. При вычислении АКФ в качестве сдвинутого на n отсчетов опорного сигнала выбирался не весь сигнал 24, а лишь его часть, где присутствует СВИП-сигнал, т.е. промежуток 13820 — 85350 отсчеты. Остальные — приняты равными нулю, т.к. в оценке ВКФ участвует только СВИП-сигнал (вертикальные составляющие отмечены на рис. 1 номерами 1–6). График АКФ для сигнала 24 приведен на рис. 3.

АКФ достигает наибольшего значения для отсчета 13820 от момента начала регистрации (рис. 3), который соответствует времени регистрации СВИП-сигнала регистратором № 24. Для $F_d = 50$ Гц это время составляет $t_1 = 13820/F_d = 276,4$ с.

Взаимокорреляционная функция аналогично (2.1) определяется [13] как

$$B_{uv}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) v(t - \tau) dt.$$

где $u(t)$ — исследуемый сигнал, $v(t - \tau)$ — опорный сигнал, имеющий некоторую корреляционную взаимосвязь с $u(t)$, со сдвигом во времени на неизвестную величину τ .

ВКФ для оцифрованных сигналов аналогично (2.2) можно рассчитать, используя соотношение

$$B_{uv}(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u_j v_{j-n}.$$

Здесь v_{j-n} — опорный СВИП-сигнал.

Как и при расчете АКФ, для определения ВКФ бесконечные пределы суммирования заменяются на конечные, которые определяются интервалом времени, где $u_j v_{j-n} \neq 0$, в качестве опорного сигнала v_{j-n} так же берется лишь промежуток от 13820 до 85350 отсчета включительно сигнала 24 (где присутствует СВИП-сигнал). Остальные отсчеты не участвуют в измерениях как относящиеся к сейсмическому некоррелированному шуму.

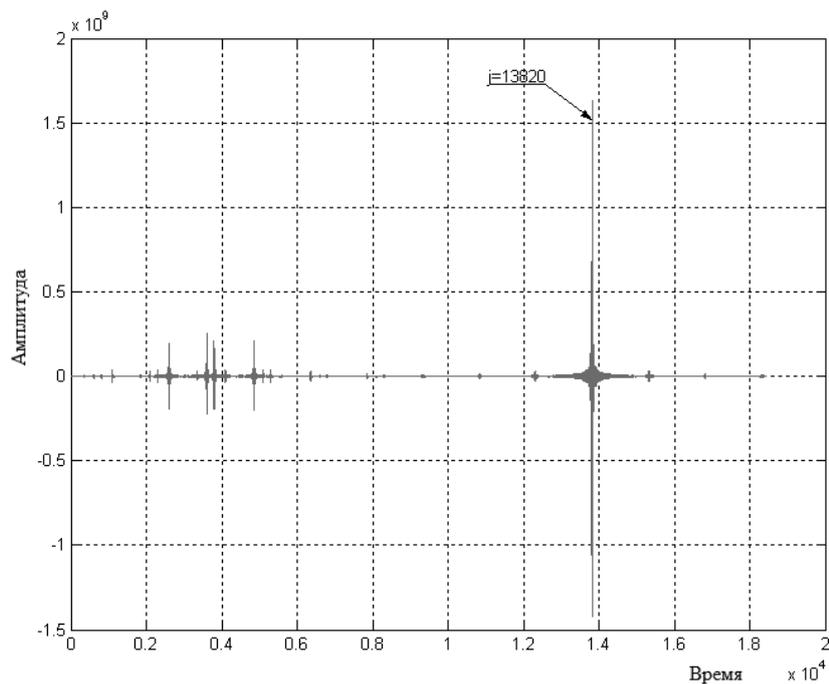


Рис. 3. Автокорреляционная функция вертикальной составляющей сигнала 24

ВКФ ЛЧМ-сигнала имеет выраженный главный лепесток по амплитуде [13], что дает возможность с высокой точностью определить время прихода ЛЧМ-сигнала к удаленному регистратору. Амплитуда главного лепестка взаимокорреляционной функции пропорциональна энергии ЛЧМ-сигнала, определяемой в свою очередь его амплитудой и длительностью. Поэтому при удаленной регистрации сигнала вибратором с целью увеличения соотношения сигнал/шум в течение сеанса работы генерировались шесть ЛЧМ сигналов через небольшие промежутки времени.

В качестве исследуемого выбран сигнал 22, записанный на расстоянии 1,5 км от источника. На рис. 4 приведен график ВКФ для сигналов 22 и 24.

Максимальная амплитуда ВКФ соответствует отсчету 15066 от момента начала регистрации, т.е. времени прихода к регистратору №22 СВИП-сигнала. Для $F_d = 50\text{Гц}$ это время составляет $t_2 = 15066/F_d = 301,32\text{ с}$.

Приводя начало записи сигналов 22 и 24 к одному моменту, т.е. вычитая из t_2 24 секунды, получим исправленное время t_2 , т.е. $t_{2u} = 277,32\text{ с}$. Разность во времени прихода волны к ближнему регистратору и удален-

ному составляет $t_{12} = t_{2u} - t_1 = 0,92\text{ с}$. Погрешность измерения времени оцифрованного сигнала равна $\Delta = \Delta t_d/2 = 1/2F_d = 0,01\text{ с}$, Δt_d — период дискретизации сигнала (0,02 с). Окончательно получаем $t_{12} = 0,92 \pm 0,01\text{ с}$.

Таким образом, сейсмическая волна дошла до регистратора №22 на 0,92 с позже, чем она достигла регистратора №24. Тогда скорость сейсмической волны равна 1,63 км/с. Рассчитанная скорость позволяет оценить состав среды. Согласно [14], скорость, равная 1,63 км/с, соответствует породам из влажной глины и песчаника.

Использование корреляционного метода даже в условиях низкого соотношения сигнал/шум позволяет определять время прихода сигнала, а соответственно и скорость сейсмической волны с большой точностью. В качестве излучаемого сигнала используется СВИП-сигнал. Дальность приема сигнала определяется энергией сигнала, которая пропорциональна амплитуде сигнала и его длительности.

Заключение

Таким образом, в работе описан один из методов обработки экспериментальных данных, являющийся частью так называемого

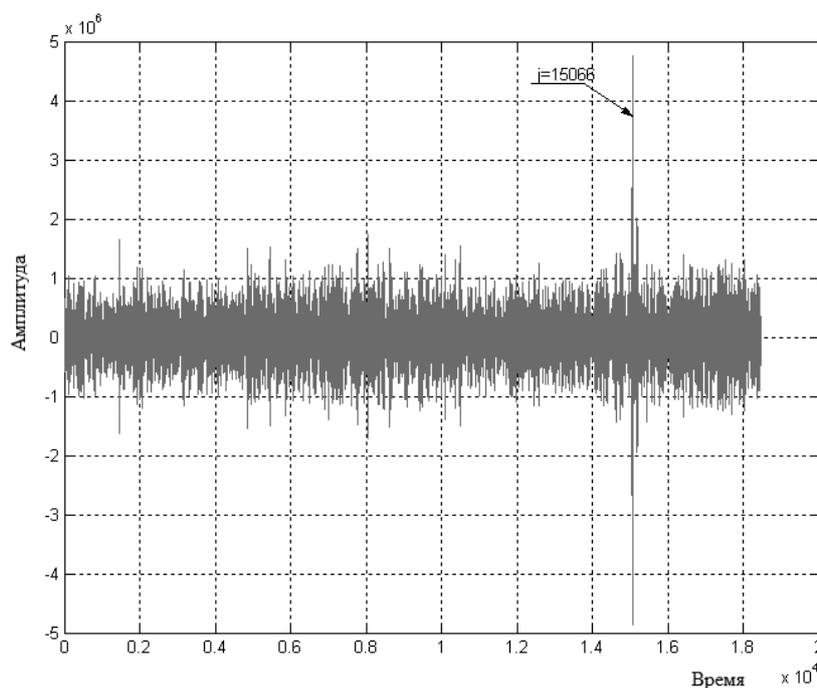


Рис. 4. График ВКФ двух сигналов 22 и 24 (вертикальные составляющие)

комплексного метода, применимого для идентификации разломов и определения зон зацепления блоков при их тектоническом взаимодействии.

На основании описанных экспериментальных исследований и обработки результатов можно сделать вывод о том, что метод оценки скоростных характеристик среды с использованием ЛЧМ-сигнала, как одну из составляющих комплексного метода, можно использовать для изучения структуры среды. Описанный метод в совокупности со спектральным анализом гармонических (монохромных) сигналов позволяет определить свойства среды и выявить месторасположения зон зацепления в блоковой структуре и описать граничные условия при сопряжении блоков, что особенно важно для создания моделей участков земной коры и породных массивов при изучении региональной сейсмичности.

Литература

1. Попков В.И. Чешуйчато-надвиговое строение Северо-Западного Кавказа // ДАН. Т. 411, №2. С. 223–225.
2. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. 320 с.
3. Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряжина О.Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. М.: Научный мир, 1999. 248 с.
4. Бабешко В.А., Мухин А.С., Бабешко О.М., Евдокимова О.В., Грищенко Д.В., Шестопалов В.Л. О некоторых свойствах сейсмических трасс // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2012. №3. С. 12–17.
5. Илюхин С.Р., Шестопалов В.Л. Исследование геодинамики региона Крым – Западный Кавказ методами GPS-измерений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2007. № 3. С. 9–17.
6. Вартанян Г.С. Некоторые деформационные механизмы функционирования эндодренажной системы Земли и сейсмичность // Отечественная геология. 2008. №2. С. 18–27.
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. Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В., Зарецкая М.В., Павлова А.В. Дифференциальный метод факторизации для блочной структуры // ДАН. 2009. Т. 424, №1. С. 36–39.
9. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Некоторые общие свойства блочных эле-

- ментов // ДАН. 2012. Т. 442, №1. С. 37–40.
10. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Топологический метод решения граничных задач и блочные элементы // ДАН. 2013. Т. 449, №6. С. 657–660.
 11. 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.
 12. Бабешко В.А., Бабенко Г.В., Мухин А.С. Патент на изобретение №2118806. Вибростенд. Приоритет от 24.07.1996 г.
 13. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988. 488 с.
 14. Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. М.: Недра, 1970. 552 с.
- References**
1. Popkov, V.I. Scaly-thrust structure of the North-Western Caucasus. *Rep. of the Academy of Sciences*, vol. 411, no. 2, pp. 223–225. (In Russian)
 2. Vorovich, I.I., Babeshko, V.A. *Dynamic mixed problems of elasticity theory for nonclassical domains*. Nauka, Moscow, 1979. (In Russian)
 3. Vorovich, I.I., Babeshko, V.A., Pryakhina, O.D. *Dynamics of massive bodies and resonant phenomena in deformable media*. Nauchniy mir, Moscow, 1999.
 4. Babeshko, V.A., Mukhin, A.S., Babeshko, O.M., Evdokimova, O.V., Grischenko, D.V., Shestopalov, V.L. On some properties of seismic traces. *Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea Economic cooperation*, 2012, no. 3, pp. 12–17. (In Russian)
 5. Plyukhin, S.R., Shestopalov, V.L. Study of the geodynamics of the Crimea – Western Caucasus region using GPS measurements. *Izvestiya Vuzov “Geodesy and aerophotography”*, 2007, no. 3, pp. 9–17. (In Russian)
 6. Vartanyan, G.S. Some deformation mechanisms of functioning of endodrenage system of the Earth and seismicity. *Otechestvennaya geologiya [Domestic geology]*, 2008, no. 2, pp. 18–27. (In Russian)
 7. Mukhin, A.S., Pavlova, A.V., Telyatnikov, I.S. To methods of investigation of block lithospheric structures. *Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea Economic cooperation*. 2017, no. 1, pp. 65–73. (In Russian)
 8. Babeshko, V.A., Babeshko, O.M., Evdokimova, O.V., Zaretskaya, M.V., Pavlova, A.V. Differential factorization method for block structure. *Rep. of the Academy of Sciences*, 2009, vol. 424, no. 1, pp. 36–39. (In Russian)
 9. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. Some common properties of block elements. *Rep. of the Academy of Sciences*, 2012, vol. 442, no. 1, pp. 37–40. (In Russian)
 10. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. Topological method for solving boundary value problems and block elements. *Rep. of the Academy of Sciences*, 2013, vol. 449, no. 6, pp. 657–660. (In Russian)
 11. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. To the problem of the physico-mechanical forerunner of the initial earthquake: place, time, intensity. *Rep. of the Academy of Sciences*, 2016, vol. 466, no. 6, pp. 664–669. (In Russian)
 12. Babeshko, V.A., Babenko, G.V., Mukhin, A.S. Patent for invention no. 2118806. Vibrating stand. Priority of 24.07.1996. (In Russian)
 13. Baskakov, S.I. Radio engineering circuits and signals. Vysshaya shkola, Moscow, 1988. (In Russian)
 14. Gurvich, I.I. Seismic exploration. Nedra, Moscow, 1970. (In Russian)