

СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАДИЕНТНОЙ УСТАНОВКИ

© 2019 К.С. Непейна¹, П.А. Казначеев², П.Н. Александров³

¹Научная станция РАН в г. Бишкеке (НС РАН), Бишкек, Киргизская республика, 720049;
e-mail: neks@gdirc.ru;

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, 123242;

³Центр Геоэлектромагнитных Исследований ИФЗ РАН
(ЦГЭМИ ИФЗ РАН), Москва, Троицк, Россия, 108840

В статье рассмотрены методические вопросы регистрации сейсмического волнового поля трехкомпонентной градиентной установкой и обработки данных с целью выделения сейсмического поля эндогенного происхождения. Процессы разрушения горных пород формируют сейсмозмиссионные эффекты и создают специфические волновые картины упругого поля в деформируемой среде, которые можно анализировать при проведении геофизического мониторинга. Установление наличия эндогенных источников упругих волн на основе предложенного эксперимента позволяет наблюдать активизацию литосферы Тянь-Шаня. Предложены оценки энергетических характеристик сейсмического поля, генерируемого эндогенными источниками. Проанализирована возможная причинно-следственная связь между лунно-солнечными приливами и активизацией эндогенных источников. Разработаны основы метода изучения необратимых деформаций по измерениям сейсмического поля на поверхности Земли с использованием градиентной установки. В качестве примера использовались данные, полученные на режимной электромагнитной станции Чон-Курчак Научной станции РАН в г. Бишкеке на территории Бишкекского геодинамического полигона.

Ключевые слова: градиентная установка, сейсмическая эмиссия, трещинообразование, Тянь-Шань.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процессы разрушения горных пород и, соответственно, изменение их свойств наблюдаются при различных геологических процессах, происходящих на Земле. Эти процессы сопровождаются как обратимыми, так и необратимыми деформациями. Необратимые деформации возникают при напряжениях, превосходящих некоторый предел прочности горной породы, близкий к пределу упругости. Косвенные проявления необратимых деформаций представляют объект исследования настоящей работы. Известно, что в сейсмически активных регионах периодически наблюдается активизация деформационных процессов в земной коре, вариации напряженно-деформационного состояния среды и, соответственно, рост тектонических напряжений (Соболев, 2014; Хаврошкин, 1999). Как следствие этого, происходит рост тангенциальных

(касательных) напряжений, развитие трещин и формирование очагов землетрясений. В связи с этим существует проблема надежного выделения (детектирования и идентификации) событий, сопровождающих формирование трещин в горных породах. Последнее приводит к генерации сейсмического шума (Соболев, 2014). Установление взаимосвязей литосферных процессов и получение информации об образовании трещин скола, при которых реализуется квазиупругий рост магистральной трещины, являются актуальными задачами при проведении геофизического мониторинга геодинамических процессов. Эти микроразрушения генерируют источники, формирующие сейсмические шумовые сигналы. Такое явление носит название сейсмической эмиссии (СЭ). Чаще всего под сейсмической эмиссией подразумевают поток сейсмических сигналов от эндогенных источников (Рыкунов и др., 1983; Соболев, 2014; Хаврошкин, 1999).

Активность СЭ проявляется спорадически и зависит от текущего напряженно-деформированного состояния литосферы. Причинами появления источников СЭ могут служить как внутренние процессы — тектонические движения, так и внешние воздействия, в частности — лунно-солнечные приливы.

В настоящей работе рассматриваются методологические основы изучения СЭ на примере измерений сейсмического поля, обладающего шумоподобными характеристиками, с использованием градиентной установки.

Целью исследования является установление наличия эндогенных источников упругих волн, формирующих СЭ, связанных с процессами разрушения горных пород в литосфере Земли. Практические примеры представлены по экспериментам, проведенным на Тянь-Шане. Этот регион характеризуется активным проявлением современных геодинамических процессов (Баталев, 2014; Баталева, 2005; Киссин, 1997; Леонов и др., 2007; Рыбин и др., 2016).

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА

Согласно работе Соболева (2014), СЭ является результатом сложения сигналов от множества микротрещин при активизации разрушения. Они представляют собой наиболее мощные источники СЭ. Можно полагать, что определенно существует пространственно-временная дискретность источников, связанных с образованием трещины как импульсного и точечного источника (Александров, 2009).

Основная идея проведения эксперимента по мониторингу геодинамических процессов с использованием техник инженерной сейсморазведки и сейсмологии заключается в получении информации об эндогенных источниках сейсмического поля на основе селекции (фильтрации) зарегистрированных волн по направлению их распространения с тем, чтобы выделять поля, связанные с процессами трещинообразования в литосфере. Рассмотрим задачу об определении направления распространения волны.

Для количественной оценки распространения волны (ее направления, частоты колебаний и др.) принято использовать определенные измеримые параметры волнового поля, например, значения амплитуды колебаний. Пусть задано поле $f(x, y, z, t)$, распространяющееся в среде. Приравниваем эту функцию пространственных координат x, y, z и времени t константе $f(x, y, z, t) = const(x, y, z, t)$. В этом случае появляется сложная функция вида $\tilde{f}(x(t), y(t), z(t), t)$, любая частная производная от которой будет равна нулю (Корн, Корн, 1973). Продифференцируем эту функцию по времени:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \tilde{f}(x(t), y(t), z(t), t) &= 0 = \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \tilde{f} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \tilde{f} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \tilde{f} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \tilde{f} = \\ &= \text{grad} \tilde{f} \cdot \mathbf{V} + \frac{\partial}{\partial t} \tilde{f} \end{aligned} \quad (1)$$

Равенство (1) будет всегда выполняться, если положить вектор скорости упругой волны \mathbf{V} равным:

$$\mathbf{V} = -\mathbf{i} \frac{\frac{\partial}{\partial t} \tilde{f}}{\frac{\partial \tilde{f}}{\partial x}} - \mathbf{j} \frac{\frac{\partial}{\partial t} \tilde{f}}{\frac{\partial \tilde{f}}{\partial y}} - \mathbf{k} \frac{\frac{\partial}{\partial t} \tilde{f}}{\frac{\partial \tilde{f}}{\partial z}}, \quad (2)$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ — орты декартовой системы координат (единичные векторы), $\tilde{f} = \{S_x, S_y, S_z\}$ — любая компонента вектора смещения $\mathbf{S} = \mathbf{i}S_x + \mathbf{j}S_y + \mathbf{k}S_z$ (в приближении плоской волны).

Отсюда направление распространения волны будет определяться выражением:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|}.$$

Этот же результат можно получить, учитывая, что скорость определяется производными пространственных координат по времени:

$$\mathbf{V} = \mathbf{i} \frac{\partial x}{\partial t} + \mathbf{j} \frac{\partial y}{\partial t} + \mathbf{k} \frac{\partial z}{\partial t}.$$

С использованием правила дифференцирования сложной функции (Корн, Корн, 1973), например,

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{\frac{\partial f}{\partial t}}{\frac{\partial f}{\partial x}},$$

вектор скорости можно найти в виде выражения, полностью аналогичного формуле (2).

Таким образом, для каждой компоненты вектора смещения получим три вектора скорости распространения сейсмического поля:

$$\mathbf{V}_x = -\mathbf{i} \frac{\frac{\partial}{\partial t} S_x}{\frac{\partial S_x}{\partial x}} - \mathbf{j} \frac{\frac{\partial}{\partial t} S_x}{\frac{\partial S_x}{\partial y}} - \mathbf{k} \frac{\frac{\partial}{\partial t} S_x}{\frac{\partial S_x}{\partial z}},$$

для компоненты S_x ;

$$\mathbf{V}_y = -\mathbf{i} \frac{\frac{\partial}{\partial t} S_y}{\frac{\partial S_y}{\partial x}} - \mathbf{j} \frac{\frac{\partial}{\partial t} S_y}{\frac{\partial S_y}{\partial y}} - \mathbf{k} \frac{\frac{\partial}{\partial t} S_y}{\frac{\partial S_y}{\partial z}},$$

для компоненты S_y ;

$$\mathbf{V}_z = -\mathbf{i} \frac{\frac{\partial}{\partial t} S_z}{\frac{\partial S_z}{\partial x}} - \mathbf{j} \frac{\frac{\partial}{\partial t} S_z}{\frac{\partial S_z}{\partial y}} - \mathbf{k} \frac{\frac{\partial}{\partial t} S_z}{\frac{\partial S_z}{\partial z}},$$

для компоненты S_z .

Для каждой компоненты вектора смещения введем вектор направления распространения волны следующими выражениями:

$$\mathbf{n}_x = \frac{\mathbf{V}_x}{|\mathbf{V}_x|}, \mathbf{n}_y = \frac{\mathbf{V}_y}{|\mathbf{V}_y|}, \mathbf{n}_z = \frac{\mathbf{V}_z}{|\mathbf{V}_z|}.$$

Эти векторы $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z$ не зависят от величины смещения, обладают единичной длиной и характеризуют только направление распространения волны. Благодаря такому преобразованию, путем выбора векторов определенного направления, например, субвертикального, можно перейти к рассмотрению волн, приходящих из нижнего полупространства в точку наблюдения, находящуюся на дневной поверхности.

Для количественной оценки сейсмической эмиссии введем энергетическую характеристику сейсмического поля эндогенного происхождения:

$$\begin{aligned} |E_x(t)| &= \sqrt{\int_t^{t+\Delta t} |\tilde{S}_x(\tau)|^2 d\tau}, \\ |E_y(t)| &= \sqrt{\int_t^{t+\Delta t} |\tilde{S}_y(\tau)|^2 d\tau}, \\ |E_z(t)| &= \sqrt{\int_t^{t+\Delta t} |\tilde{S}_z(\tau)|^2 d\tau}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tilde{S}_x, \tilde{S}_y, \tilde{S}_z$ — компоненты сейсмического поля эндогенного происхождения; Δt — интервал непрерывной регистрации сейсмического поля (в экспериментах он был равен одному часу); $|E_x(t)|, |E_y(t)|, |E_z(t)|$ — энергетические характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения, вычисленные по каждой компоненте сейсмического поля, распространяющегося субвертикально вверх.

Научная станция РАН в г. Бишкеке на протяжении уже нескольких лет располагает сетями геофизического мониторинга (http://www.gdirc.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=46:2012-08-09-06-42-31&catid=34:2012-08-09-06-40-48&Itemid=65) в пределах Киргизского хребта. Все пункты регистрации находятся в тензочувствительных зонах, что позволяет наблюдать проявления геодинамических процессов. На базе существующей сети электромагнитного мониторинга с режимными станциями было решено провести сейсмический мониторинг современных геодинамических процессов непосредственно в тех же точках режимных наблюдений, поскольку есть все условия для осуществления полевого эксперимента (например, обеспечение бесперебойного электропитания). В качестве примера изучения необратимых деформаций в литосфере приведем полевой эксперимент на

режимной станции Чон-Курчак, расположенной на северных отрогах Киргизского хребта Северного Тянь-Шаня (<http://www.gdirc.ru/lgmi/2012-08-14-09-20-49/2012-08-14-09-21-56>). Для этого эксперимента была разработана и реализована система наблюдения (рис. 1), регистрирующая сейсмическое волновое поле, получившая название градиентной, поскольку из выражения (1) следует, что она непосредственно связана с градиентом поля (Казначеев и др., 2018). В ходе работ были решены методические вопросы регистрации и обработки данных.

Градиентная регистрирующая установка состоит из 6 приемников (рис. 1). Приемники представляют собой однокомпонентные велосиметры GS-20DX производства Geospace (Geospace Technologies, США), скомпонованные по три штуки на одной посадочной площадке во взаимно перпендикулярных направлениях. Базовыми чувствительными элементами приемников являются однокомпонентные велосиметры GS-20DX, сориентированные в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Таким образом, любой приемник, обозначенный на рис. 1 под номерами 1–6, составлен из трех велосиметров: одного велосиметра, который измеряет колебания в вертикальной плоскости, и двух — в горизонтальной. Обобщая, конструкция приемника имитирует трехкомпонентный сейсмометр. В результате было использовано 18 велосиметров, каждые 6 из которых регистрируют определенные взаимно перпендикулярные направления колебаний. Для управления установкой и захвата данных была разработана

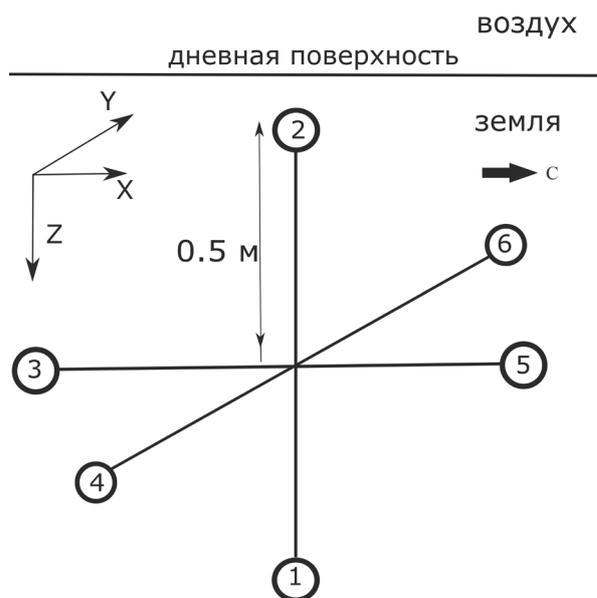


Рис. 1. Схема расположения трехкомпонентных датчиков (под номерами 1–6) сейсмического поля.

Fig. 1. Seismic gradient system diagram equipped with three-component geophones (with the numbers from 1 to 6).

программа (свидетельство о гос. регистрации № 2019618732), позволяющая синхронно регистрировать сигналы при наличии многоканальной коммутации на вход одиночного аналого-цифрового преобразователя (Казначеев, Непейна, 2019). Каждый велосиметр GS-20DX имеет свой выводной кабель длиной 0.5 м с разъемом NGPI типа КСК-2 для подключения к стандартной сейсморазведочной косе. Такие скомплектованные приемники далее мы будем называть «трехкомпонентными сейсмоприемниками». Они помещались на глубину 0.5 м от поверхности земли (сейсмоприемники с номерами 3, 4, 5, 6), на глубину 1 м (сейсмоприемник с номером 1), и на дневной поверхности (сейсмоприемник с номером 2) (Казначеев и др., 2019). Расстояние между сейсмоприемниками выбиралось из условия численного дифференцирования сейсмического поля по пространственным координатам (Тихонов, Арсеньев, 1986). Численное дифференцирование по времени согласовывалось с шагом дискретизации записи сейсмического поля, который определялся регистрирующей аппаратурой и был равен 0.3 с (Казначеев, Непейна, 2019). База установки для определения пространственных производных составила 1 м. Таким образом, размеры установки охватывают крайне малый объем среды равный 1 м^3 , который можно считать однородным и изотропным по сравнению с масштабами и контрастами по упругим параметрам региональной геологической структуры. Такая глубина, к тому же, обеспечивает уменьшение влияния ветра и внешних помех (Александров, Казначеев, 2018). Отметим также, что достоинством разработанной реализации градиентной установки является экономичность, простота размещения и компактность.

Принципиально важным для дальнейших математических расчетов является требование вычисления всех производных во временной области, поскольку при переходе в спектральную область, после преобразования Фурье, теряется возможность разделения упругого поля по направлению распространения волн. Цифровая обработка зарегистрированных данных велась в разработанной для этих целей программе (свидетельство о гос. регистрации № 2019618936) (Александров, Непейна, 2019).

Обработка данных включала выделение из общего потока СЭ полей с направляющими $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z$ по каждой компоненте сейсмического поля S_x, S_y, S_z , которые приходят из нижнего полупространства, конкретно, из выбранного сектора угловыми размерами около $\pi/5$ стерадиан, ориентированного строго вниз. Заданный сектор занимает площадь с углом отклонения от нормали 45° . Отметим, что по результатам экспериментов доля сигналов с направлениями

внутри указанного сектора от количества всех сигналов примерно совпадает с отношением размера сектора ко всему нижнему полупространству (около $1/10$).

Графически результаты выделения сейсмических полей, распространяющихся субвертикально вверх, по каждой компоненте векторного сейсмического поля, удобнее всего представить точками на единичной сфере или полусфере, построенными в сферической системе координат. На рис. 2 представлены фрагменты регистрации сейсмического поля в течение 1 часа (верхние 6 графиков, каналы 7–12) и результаты обработки данных (нижние 6 графиков, каналы 1–6). Каждая точка на полусфере является началами векторов $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z$, проведенных в центр сферы (рис. 2), и характеризует приход волны, распространяющейся субвертикально вверх в определенный момент времени. Следует отметить, что направления распространения сейсмических волн, распространяющихся субвертикально вверх и определенных по разным компонентам сейсмического поля, не совпадают по времени.

Общее время наблюдения составляло 60 часов. По каждому часу вычислялись энергетические характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения. Энергетическая характеристика свидетельствует о наличии активных эндогенных источников сейсмического поля. Энергетическая характеристика оценивалась в окнах длительностью 1 час (рис. 3).

Несмотря на то, что моменты времени прихода сейсмических полей, распространяющихся субвертикально вверх, не совпадают по разным компонентам, имеет место синхронное изменение поведения энергетических характеристик сейсмического поля эндогенного происхождения по этим компонентам.

Эти данные сопоставлялись с лунно-солнечными приливами, рассчитываемые с помощью программы TIDE_3.exe, находящейся в открытом доступе. С ее помощью можно построить ряды лунных, солнечных и лунно-солнечных ускорений с учетом заданных координат и с определенным шагом дискретизации. Наиболее интересными с точки зрения нахождения зависимостей геофизических параметров для дальнейшего исследования являются изменения модуля полного вектора приливообразующего ускорения (A). Пример анализируемых расчетных данных по приливообразующему ускорению показан на рис. 4.

Общий вид функции взаимной корреляции (рис. 5) между изменением приливного ускорения и энергетическими характеристиками свидетельствует о наличии возможной согласованности между двумя этими процессами с некоторой задержкой по времени. При этом, сначала меняется значение амплитуды лунно-

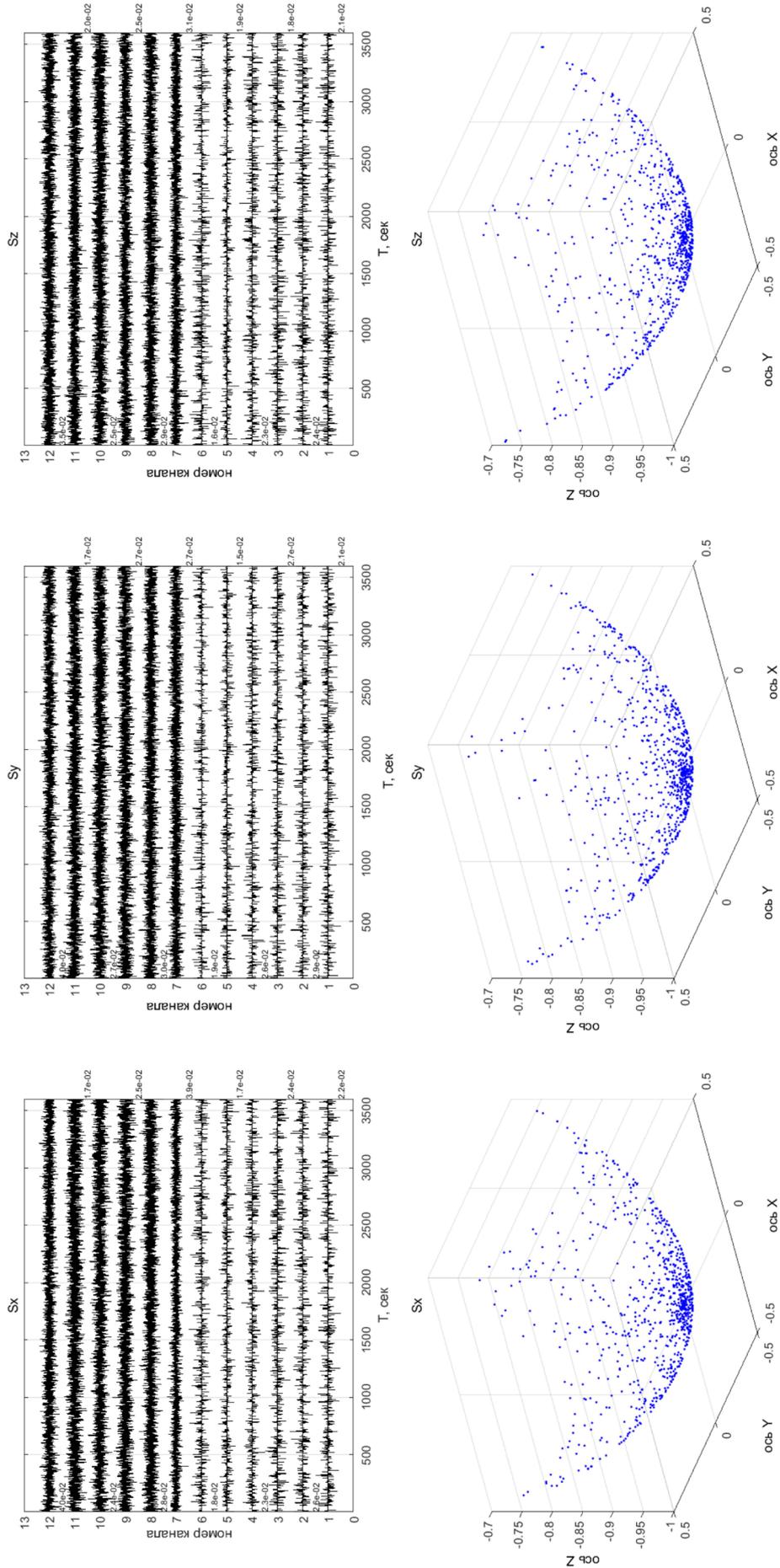


Рис. 2. Фрагмент записи сейсмических сигналов и результаты выделения сейсмических полей эндогенного происхождения по данным измерения компонент: S_x , S_y , S_z .

Fig. 2. A fragment of the seismic signal recording and processing results of extraction for the endogenous seismic field measured by each component: S_x , S_y , S_z .

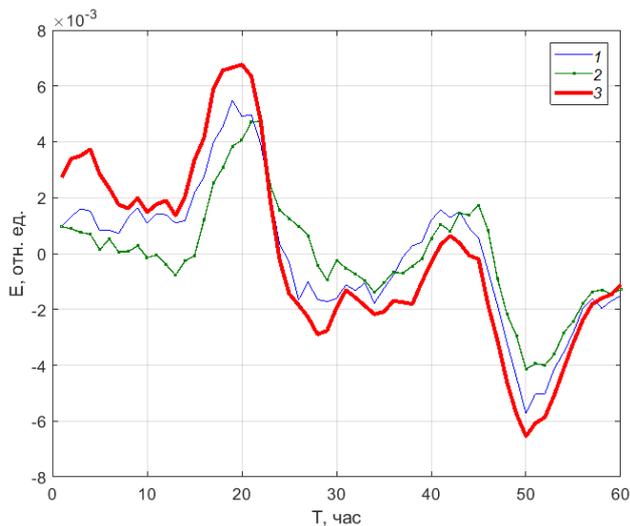


Рис. 3. Энергетические характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения за вычетом среднего по каждой компоненте вектора смещения $\tilde{S}_x, \tilde{S}_y, \tilde{S}_z$ (линии 1 – \tilde{S}_x , 2 – \tilde{S}_y , 3 – \tilde{S}_z), вычисленные по формуле (3).

Fig. 3. Energy characteristics of the endogenous seismic field minus the average calculated for each component of the displacement vector $\tilde{S}_x, \tilde{S}_y, \tilde{S}_z$ (lines 1 – \tilde{S}_x , 2 – \tilde{S}_y , 3 – \tilde{S}_z), calculated as in equation (3).

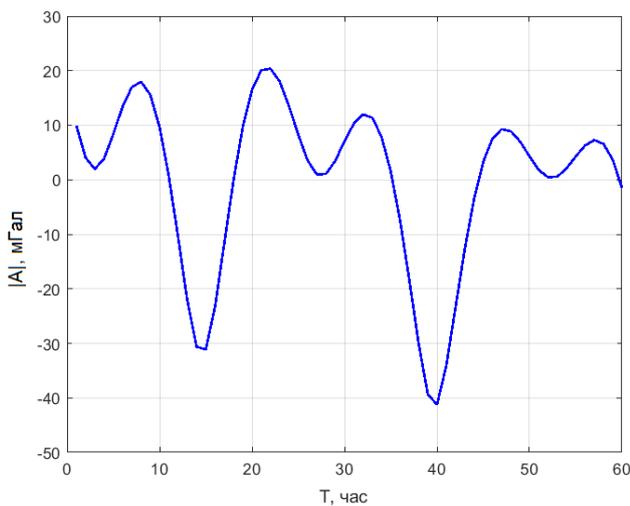


Рис. 4. Расчетные данные для вертикальной компоненты ускорения лунно-солнечных приливов на станции Чон-Курчак.

Fig. 4. The lunar-solar tides, calculated data for the vertical component of acceleration at the Chon-Kurchak station.

солнечных приливов, а затем, с интервалом порядка нескольких часов, меняется энергетическая характеристика сейсмического поля эндогенного происхождения. Анализ поведения корреляционной функции позволяет выдвинуть гипотезу о причинно-следственной связи между приливами и энергетической характеристикой сейсмического поля эндогенного происхождения. Таким образом, энергетические харак-

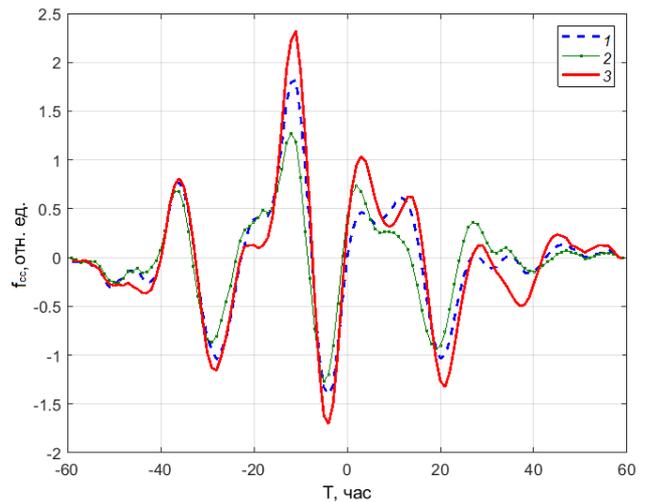


Рис. 5. Функции взаимной корреляции между лунно-солнечными приливами и энергетическими характеристиками сейсмического поля эндогенного происхождения, вычисленными по трем компонентам (линии 1 – \tilde{S}_x , 2 – \tilde{S}_y , 3 – \tilde{S}_z).

Fig. 5. Cross correlation functions between lunar-solar tides and energy characteristics for the endogenous seismic field, calculated at three components (lines 1 – \tilde{S}_x , 2 – \tilde{S}_y , 3 – \tilde{S}_z).

теристики сейсмического поля эндогенного происхождения связаны с лунно-солнечными приливами со сдвигом во времени.

Таким образом, под воздействием лунно-солнечных приливов протекают процессы деформирования и трещинообразования в литосфере Земли, и генерируются источники сейсмического поля эндогенного происхождения, распространяющегося субвертикально вверх, к дневной поверхности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В данной работе разработаны основы метода изучения необратимых деформаций по измерениям сейсмического поля на поверхности Земли с использованием градиентной установки. Этот метод представляет собой пространственную фильтрацию измеренного на дневной поверхности сейсмического поля по направлению его распространения, с исключением поля от поверхностных и экзогенных источников. Для оценки энергетического вклада составляющей сейсмического поля эндогенного происхождения введена энергетическая характеристика. Экспериментальные данные на режимной электромагнитной станции Чон-Курчак Научной станции РАН в г. Бишкеке показали положительные результаты мониторинга процессов трещинообразования с использованием сейсмической градиентной установки. Такое методическое

решение позволяет диагностировать активизацию необратимых деформаций в виде процесса трещинообразования в литосфере Земли.

Обнаружена предположительная взаимосвязь двух наблюдаемых процессов: сначала происходят лунно-солнечные приливы, а затем, с некоторым интервалом времени задержки, меняется энергетическая характеристика сейсмического поля эндогенного происхождения. На этом основании выдвинута гипотеза о причинно-следственной связи между лунно-солнечными приливами и изменениями энергетических характеристик сейсмического поля эндогенного происхождения на основе анализа поведения функции взаимной корреляции. Отметим, что все энергетические характеристики для каждой из трех компонент сейсмического поля (направленных субвертикально вверх импульсов) изменяются синхронно. Это свидетельствует о наличии совокупности источников, проявляющегося как на вертикальных, так и на горизонтальных компонентах сейсмического поля, наблюдаемого на поверхности Земли.

Метод анализа энергетических характеристик с применением градиентной установки имеет перспективу своего развития, связанного с возможностью вычисления ротора и дивергенции сейсмического поля, что позволит разделять его на поперечные и продольные волны, а также вычислять тензор деформаций. Одна из основных задач дальнейших исследований — определение местоположения и интенсивности необратимых деформаций горной породы в литосфере, что требует дальнейшей модернизации системы наблюдения и регистрирующей аппаратуры.

Авторы благодарят сотрудников Лаборатории глубинных магнитотеллурических исследований Научной станции РАН в г. Бишкеке, способствовавших реализации исследований и проведения полевых работ. Особую признательность и благодарность авторы выражают к.ф.-м. наук В.Д. Брагину за помощь в подготовке данной публикации. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-00844 и частично — в рамках гос. задания ИФЗ РАН.

Список литературы [References]

- Александров П.Н.* К теории сейсмического и электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2(14). С. 49–58 [*Aleksandrov P.N.* To theory of seismic and electromagnetic monitoring of the modern geodynamic processes // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2009. № 2. Вып. 14. P. 49–58 (in Russian)].
- Александров П.Н., Казначеев П.А.* Анализ волнового поля, измеряемого градиентной установкой / Тезисы докладов Международной Юбилейной

научной конференции, посвященной 40-летию со дня образования Научной станции РАН в г. Бишкеке «Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений». Бишкек: НС РАН. 2018. С. 139–146 [*Aleksandrov P.N., Kaznacheev P.A.* Analiz volnovogo polya, izmeryayemogo gradiyentnoy ustanovkoy / Abstracts. International Jubilee Conference dedicated to the 40th Anniversary from the foundation of Research Station «Influence of External Fields on Seismic Regime and Monitoring of Their Manifestations». Bishkek: RS RAS. 2018. P. 139–146 (in Russian)].

Александров П.Н., Непейна К.С. Программа обработки данных регистрации сейсмических данных, зарегистрированных градиентной установкой / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2019618936 от 08.07.2019. М.: Роспатент, 2019 [*Aleksandrov P.N., Nepeina K.S.* Programma obrabotki dannyh registracii sejsmicheskikh dannyh, zaregistririvannykh gradiyentnoy ustanovkoy / Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii programmy dlja JeVM. № 2019618936 от 08.07.2019. Moscow: Rospatent, 2019. (in Russian)].

Баталев В.Ю. Структура и состояние вещества литосферы Центрального Тянь-Шаня (по данным глубинных магнитотеллурических зондирований) / Дисс. докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2014. 282 с. [*Batalev V.Yu.* Struktura i sostoyaniye veshchestva litosfery Tsentral'nogo Tyan'-Shanya (po dannym glubinnnykh magnitotelluricheskikh zondirovaniy) / Dis. dokt. geol.-min. nauk. Novosibirsk, 2014. 282 p. (in Russian)].

Баталева Е.А. Глубинная структура крупнейших разломных зон западной части киргизского Тянь-Шаня и современная геодинамика (по данным магнитотеллурических зондирований) / Дисс. канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2005. 200 с. [*Bataleva E.A.* Glubinnaya struktura krupneyshikh razlomnykh zon zapadnoy chasti kirgizskogo Tyan'-Shanya i sovremennaya geodinamika (po dannym magnitotelluricheskikh zondirovaniy) / Dis. k. geol.-min. nauk. Novosibirsk, 2005. 200 p. (in Russian)].

Казначеев П.А., Непейна К.С. Программа для синхронной регистрации сигналов с многоканальной коммутацией на вход одиночного аналого-цифрового преобразователя / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618732 от 04.07.2019. М.: Роспатент, 2019 [*Kaznacheev P.A., Nepeina K.S.* Programma dlja sinhronnoy registracii signalov s mnogokanal'noj kommutaciej na vkhod odinochnogo analogo-cifrovogo preobrazovatelja / Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii programmy dlja JeVM № 2019618732 от 04.07.2019. М.: Роспатент, 2019. (in Russian)].

Казначеев П.А., Матюков В.Е., Александров П.Н., Непейна К.С. Разработка трехкомпонентной градиентной установки для регистрации сейсмоакустического поля в геодинамически активных областях / Тезисы докладов Международной Юбилейной научной конференции, посвященной 40-летию со дня образования Научной станции РАН в г. Бишкеке «Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений». Бишкек: НС РАН. 2018. С. 54–57 [*Kaznacheev P.A., Matyukov V.E., Aleksandrov P.N., Nepeina*

- K.S.* Razrabotka trekhkomponentnoy gradiyentnoy ustanovki dlya registratsii seysmoakusticheskogo polya v geodinamicheski aktivnykh oblastiakh / Abstracts. International Jubilee Conference dedicated to the 40th Anniversary from the foundation of Research Station «Influence of External Fields on Seismic Regime and Monitoring of Their Manifestations». Bishkek: RS RAS. 2018. P. 54–57 (in Russian).
- Казначеев П.А., Матюков В.Е., Александров П.Н., Непейна К.С.* Разработка и опробование трехкомпонентной градиентной установки для регистрации сейсмоакустического поля в геодинамически активных регионах // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 1. С. 46–58. <https://doi.org/10.21455/si2019.1-3> [*Kaznacheev, P.A., Matiukov, V.E., Aleksandrov, P.N., Nepeina K.S.* Development of a Three-Axis Gradient System for Seismoacoustic Data Acquisition in Geodynamically Active Regions // *Seism. Instr.* 2019. V. 55. P. 535–543. <https://doi.org/10.3103/S0747923919050062>].
- Казначеев П.А., Непейна К.С.* Алгоритм регистрации сейсмоакустических сигналов с многоканальной коммутацией при неизвестном уровне высокочастотных помех // Современная техника и технологии в научных исследованиях. Сборник материалов XI Международной конференции молодых ученых и студентов. В 2-х томах. 2019. С. 85–88 [*Kaznacheev P.A., Nepeina K.S.* Algorithm of registration of seismoacoustic signals with multichannel commutation with an unknown level of high-frequency interference // *Modern technology and technology in scientific research. Collection of materials of the XI International Conference of Young Scientists and Students.* In 2 volumes. 2019. P. 85–88. (in Russian)].
- Киссин И.Г., Рузайкин А.И.* Соотношение между сейсмоактивными и электропроводящими зонами в земной коре Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли. 1997. Т. 33. № 1. С. 21–29 [*Kissin I.G., Ruzaiкин A.I.* Relations between seismically active and electrically conductive crustal zones in the Kyrgyz Tien Shan // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth.* 1997. V. 33. № 1. P. 18–25].
- Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с. [*Korn G.A., Korn T.M.* *Mathematical handbook: For scientists and engineers*, 1968. McGraw-Hill Book Company, New York, USA. 1130 p.].
- Леонов М.Г., Морозов Ю.А., Никитин А.В.* О тектонической деформации гранитов Тянь-Шаня и Забайкалья // Доклады академии наук. 2007. Т. 417. № 6. С. 799–805 [*Leonov M.G., Morozov Y.A., Nikitin A.V.* Tectonic deformation of granites in the Tien Shan and Transbaikal regions // *Doklady Earth Sciences.* 2007. V. 417. № 2. P. 1348–1354. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07090127>].
- Рыбин А.К., Баталева Е.А., Леонов М.Г.* и др. Современная геодинамическая активность земной коры северного Тянь-Шаня и опасные геологические процессы // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2016. Т. 16. № 5. С. 157–163 [*Rybin A.K., Bataleva E.A., Leonov M.G. et al.* Modern geodynamic activity of the Northern Tien Shan Earth Crust and dangerous geological processes // *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta.* 2016. V. 16. № 5. P. 157–163 (in Russian)].
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В.* Сейсмическая эмиссия как волновой «отклик» среды // Физика удара и волновая динамика в космосе и на Земле. М.: ВАГО АН СССР, 1983. С. 284–295 [*Rykunov L.N., Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V.* Seismicheskaya emissiya kak volnovoy «otklik» sredy // *Fizika udara i volnovaya dinamika v kosmose i na Zemle.* M.: VAGO AN SSSR, 1983. P. 284–295 (in Russian)].
- Соболев Г.А.* Сейсмический шум. М.: Наука и образование, 2014. 271 с. [*Sobolev G.A.* *Seismicheskii shum.* M.: Nauka i obrazovaniye, 2014. 271 p. (in Russian)].
- Тихонов А.Н., Арсеньев В.Я.* Методы решения некорректных задач. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1986. 288 с. [*Tikhonov A.N., Arsen'yev V.Ya.* *Metody resheniya nekorrektnykh zadach.* 3-ye izd., pererab. M.: Nauka, 1986. 288 p. (in Russian)].
- Хаврошкин О.Б.* Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии. М.: ОИФЗ РАН. 1999. 286 с. [*Khavroshkin O.B.* *Nekotoryye problemy nelineynoy seysmologii.* M.: OIFZ RAN. 1999. 286 p. (in Russian)].

**SEISMIC MONITORING OF MODERN GEODYNAMIC PROCESSES
USING A GRADIENT SYSTEM**

K.S. Nepeina¹, P.A. Kaznacheev², P.N. Alexandrov³

¹Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Geoelectromagnetic Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia

The article discusses the methodological issues of registration of a seismic wavefield using a three-component gradient system and data processing aimed at revealing an endogenous seismic field. The processes of rock destruction cause seismic emission effects and create specific wave pictures of the elastic field in a deformable medium, which can be analyzed during geophysical monitoring. Revealing the endogenous sources of elastic waves using the proposed experiment allows us to observe the activation of the Tien Shan lithosphere. The authors provide an estimation of the energy characteristics of the seismic field generated by endogenous sources. A possible causal relationship between lunar-solar tides and the activation of endogenous sources is analyzed. The basics of the method for studying irreversible deformations by measuring the seismic field on the Earth's surface using a gradient system have been developed. As an example, we used the data obtained at the Chon-Kurchak observation point of the Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek at the Bishkek Geodynamic Proving Ground.

Keywords: gradient system, seismic emission, fracturing, Tien Shan.