

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДАМИ ПАССИВНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ

Сергей Александрович Ефимов

Институт вычислительной математики и математической геофизики, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник лаборатории геофизической информатики, тел. (383) 330-70-69, e-mail: serg@opg.sccc.ru

В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований деформации поверхности земли методом пассивной сейсмологии. Представлена математическая модель взаимодействия крупных геологических блоков.

Ключевые слова: структура земной поверхности, сейсмический шум, математическая модель.

EXPERIMENTAL STUDY OF SURFACE DEFORMATION OF PASSIVE SEISMOLOGY

Sergey A. Efimov

Institute computing mathematicians and mathematical geophysics (ICMMG SB RAS), 630090, Russia, Novosibirsk, Pr. Lavrenteva, the house 6, geophysical research laboratory informatics, tel. (383)330-70-69, e-mail: serg@opg.sccc.ru

The article describes the results of experimental studies of deformation of the surface land of passive seismology. A mathematical model of the interaction of major geological units.

Key words: structure of the earth's surface, the seismic noise, mathematical model.

Постановка задачи. В последние десятилетия геофизиками активно разрабатываются новые методы сейсмологии для исследования структуры земной поверхности. При этом особое внимание исследователей привлекают методы пассивной сейсмологии, т.е. те методы, в которых отсутствуют искусственные источники сейсмических волн. При этом отмечается, что техногенные источники сейсмического шума, являющиеся помехой при активной сейсмологии, при использовании пассивных методов приобретают позитивных фактор. Важной теоретической базой для объяснения эффектов геодинамики послужила концепция о блочно-иерархическом строении массивов горных пород академика М.А. Садовского [1]. Это современное научное направление, активно развиваемое во многих научных центрах, формирует методологию геофизического эксперимента, результаты которого прямо или косвенно подтверждают концепцию академика М.А. Садовского. В данной работе представлено исследование данных геофизического эксперимента с целью формирования адекватной математической модели взаимодействия геологических блоков (геоблоков). Математическая модель взаимодействия геоблоков основана на концепции: энергетическое взаимодействие геоблоков аналогично поведению связанных резонансных структур.

Анализ данных геофизического эксперимента. В 1996 году в рамках проекта РФФИ сотрудниками ИВМиМГ СО РАН в районе поселка Кайтанак Горного Алтая проведены вибросейсмические эксперименты, связанные с исследованием деформации литосферы. Технология вибросейсмического просвечивания земли предполагает периодическую регистрацию сейсмического шума для оценки точности и достоверности полученных сейсмограмм. Получаемые при этом данные использованы для изучения резонансных особенностей локальных неоднородностей литосферы. Поскольку вблизи локальных резонансных образований изменяется структура волнового поля [2], здесь должен изменяться и характер спектра сейсмического шума. Обработка периодических записей сейсмического шума позволила выделить ряд признаков, которые характеризуют, по мнению автора, движение крупных геоблоков. На рис.1 приведены графики спектральных характеристик сейсмического шума в период с 23 часов 5 октября до 7 часов 6 октября 1996 года.

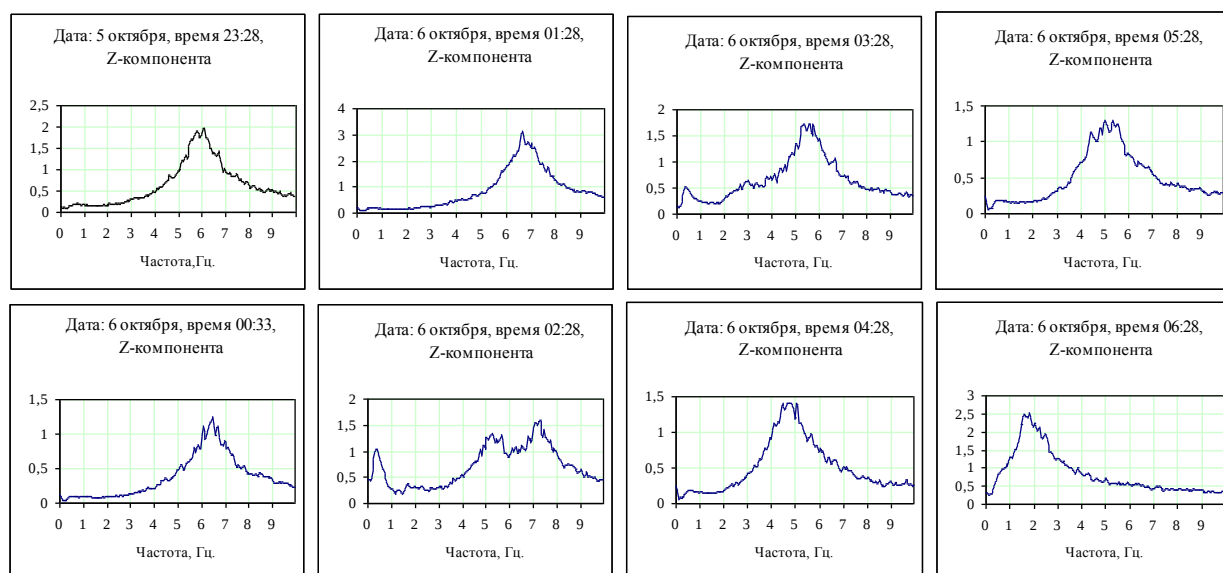


Рис. 1. Графики спектральной плотности сейсмического шума, зарегистрированные на сеймостанции «ВИРС» 5-6 октября 1996 г.

Характерной особенностью графиков рис.1 является наличие резонансных подъемов и связанные с ними максимумы. При этом значение резонансной частоты в течение указанного периода измерений меняется в диапазоне 1,5-7,5 Гц.

Отличительной особенностью графика спектральной плотности шума, зарегистрированного 6 октября в 02 часа 28 мин. (время записи 20 мин.) является присутствие двух резонансных подъемов и соответствующих им два значения резонансной частоты: 5,2 Гц и 7,2 Гц. На рис. 2 приведены графики спектральных характеристик сейсмического шума в период с 23 часов 3 октября до 7 часов 4 октября 1996 года. График спектральной плотности шума на рис.2, соответствующий регистрации шума 3 октября в 23 часа 58 мин., имеет так же две

резонансные частоты: 1,8 Гц и 7,5 Гц. Явно выраженные два резонанса могут быть обусловлены взаимодействием двух горизонтальных геоблоков. Качественный анализ динамики сейсмического шума показывает изменение параметров резонанса геоблоков в течение суток. Сравнение записей 3-4 октября с записями 5-6 октября показывает, что суточные характеристики резонанса 5-6 октября не повторяются в период 3-4 октября. Это обстоятельство приводит к гипотезе о проявлении в характеристиках сейсмического шума динамики взаимодействия геоблоков.

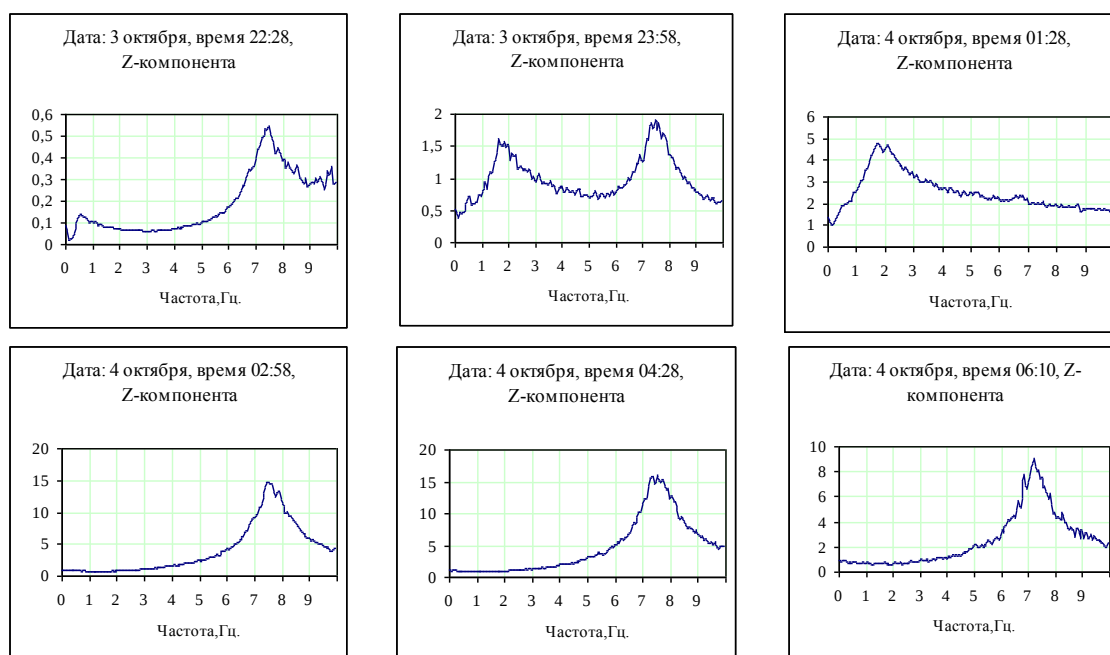


Рис. 2. Графики спектральной плотности сейсмического шума, зарегистрированные на сеймостанции «ВИРС» 3-4 октября 1996 г.

Сравнение записей 3-4 октября с записями 5-6 октября показывает, что суточные характеристики резонанса 5-6 октября не повторяются в период 3-4 октября. Это обстоятельство приводит к гипотезе о проявлении в характеристиках сейсмического шума динамики взаимодействия геоблоков. Для исследования этого явления рассмотрена следующая математическая модель: взаимодействие геоблоков соответствует поведению связанных резонансных систем, причем фактор связи между системами (а значит и обмен энергией) меняется во времени в зависимости от состояния литосферы.

Математическая модель взаимодействия геоблоков. Резонансные явления в природе связаны с колебательными системами. При наличии двух взаимосвязанных колебательных систем дифференциальное уравнение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \frac{\beta_1}{m_1} \cdot \frac{dy_1}{dt} + \frac{D_1}{m_1} y_1 + M \cdot \frac{dy_2}{dt} &= F_1, & \frac{D_1}{m_1} &= \omega_{01}^2, \\ \frac{d^2 y_2}{dt^2} + \frac{\beta_2}{m_2} \cdot \frac{dy_2}{dt} + \frac{D_2}{m_2} y_2 + M \cdot \frac{dy_1}{dt} &= F_2, & \frac{D_2}{m_2} &= \omega_{02}^2. \end{aligned} \quad (1)$$

где y – отклонение системы; dy/dt – скорость отклонения; d^2y/dt^2 – ускорение отклонения; β – коэффициент трения; D – жесткость системы; m – масса системы; ω_0 – собственная угловая частота колебаний; M – коэффициент фактора связи; F_1, F_2 – сила воздействия.

Использование операторного метода анализа приводит систему уравнения (2) к следующему виду:

$$\begin{aligned} p^2 y_1 + p \cdot \frac{\beta_1}{m_1} \cdot y_1 + \frac{D_1}{m_1} y_1 + p \cdot M \cdot y_2 &= F_1(p), \\ p^2 y_2 + p \cdot \frac{\beta_2}{m_2} \cdot y_2 + \frac{D_2}{m_2} y_2 + p \cdot M \cdot y_1 &= F_2(p). \end{aligned} \quad (2)$$

где p – оператор Лапласа.

Далее используем следующие обозначения и условия:

$$\frac{\beta_1}{m_1} = 2 \cdot \delta_1; \quad \frac{D_1}{m_1} = \omega_{01}^2; \quad F_1(p) = 1; \quad \frac{\beta_2}{m_2} = 2 \cdot \delta_2; \quad \frac{D_2}{m_2} = \omega_{02}^2; \quad F_2(p) = 1; \quad (3)$$

где δ_1, δ_2 – коэффициенты затухания; ω_{01}, ω_{02} – частоты резонанса.

Решение уравнений (2) относительно $y_1(p)$ дает следующее выражение:

$$y_1(p) = \frac{p^2 + (2 \cdot \delta_2 - M) \cdot p + \omega_{02}^2}{(1 - M^2) \cdot (p^2 + (2 \cdot \delta_1 / (1 - M^2)) \cdot p + \omega_{01}^2 / (1 - M^2)) \cdot (p^2 + 2 \cdot \delta_2 \cdot p + \omega_{02}^2)}. \quad (4)$$

Анализ выражения (4) показывает, что вид амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для связанных колебательных контуров зависит от значения коэффициента фактора связи M . На рис. 3 представлены графики АЧХ для разных значений M при одинаковых параметрах первой и второй колебательной системы. Величина a определяет относительную расстройку частоты по отношению к частоте резонанса ω_0 .

При слабой связи АЧХ ($M=0,56$) системы имеет один максимум, соответствующий частоте резонанса ω_0 . Один максимум остается до тех пор, пока величина M не достигнет критического значения. Если фактор связи M увеличивается дальше до $M=1,4$, на графике АЧХ системы появляются два близкорасположенных максимума. Дальнейшее увеличение фактора связи до $M=5,6$ приводит к провалу значения АЧХ на резонансной частоте и увеличению частотного расстояния между максимумами АЧХ колебательной системы. Сравнение графиков рис. 1, рис. 2 с графиками рис. 3, визуализирующих поведение математической модели по формуле (4), показывает адекватность использования системы связанных контуров для описания взаимодействия геоблоков.

Математическая модель взаимодействия геоблоков в соответствии с системой уравнений (2) хорошо описывает явление изменения резонансных частот и появление на графике спектральной плотности двух резонансов. Это явление обусловлено изменением величины фактора связи M . Для системы двух геоблоков фактор связи определяется степенью сжатия этих геоблоков, характеристикой трения и режима скольжения на поверхности границы геоблоков.

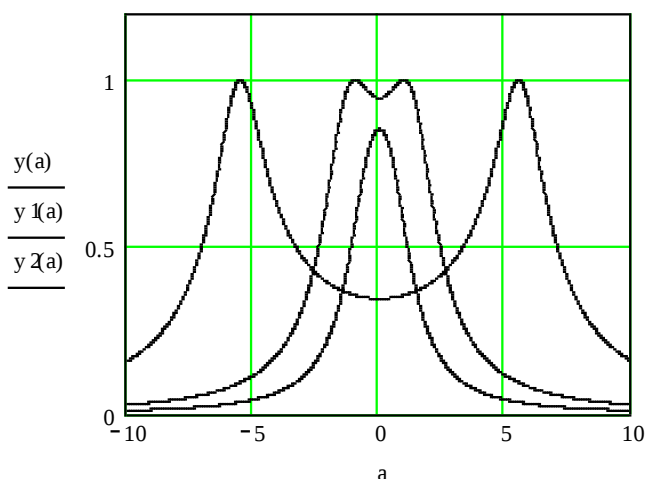


Рис. 3. Графики амплитудно-частотной характеристики для выражения (4) при разных значениях $M = \{0,56; 1,4; 5,6\}$

Рассмотрим поведение системы геоблоков по экспериментальным данным, полученным в районе п. Кайтанак 5-6 октября 1996 года (рис.1). В период с 23 час. 28 мин. 5 октября до 02 час. 28 мин. 6 октября геоблоки сжаты, но фактор связи двух геоблоков не достигает критического значения. После 02 часов 28 мин. 6 октября геоблоки сжимаются сильнее, и значение фактора связи превосходит критическую величину (появляются два резонанса). В период до 05 час. 28 мин. сила сжатия блоков ослабевает. Дальнейшее увеличение сжатия геоблоков наблюдаем в 06 час. 28 мин. На этом графике сформирован один низкочастотный резонанс на частоте 1.7 Гц. Два геоблока сжаты друг к другу настолько сильно, что превращаются в одну колебательную систему с частотой резонанса, соответствующей общей массе двух геоблоков. Этому состоянию геоблоков соответствует максимальный фактор связи. В период между 05 час. 48 мин. и 06 час 28 мин. запись сейсмического шума не проводилась и данные о параметрах резонанса отсутствуют. Однако можно предполагать, что в этот период спектральная характеристика шума имеет два резонанса, так как между докритическим значением фактора связи (05 час. 28 мин.) и максимальным значением этого фактора в 06 час 28 мин. должно быть критическое значение фактора связи. Вышеописанная интерпретация процесса взаимодействия геоблоков основана на экспериментальных данных, полученных на ограниченном временном участке. Это ограничение не позволяет выявить и определить связь полученной динамики геоблоков с конкретными тектоническими и астрономическими факторами. Тем не менее,

вышеописанное явление концептуально совпадает с современными представлениями геофизиков о строении литосферы и активном взаимодействии отдельных геоблоков.

Выводы. Результаты выполненных исследований показывают суточную эволюцию взаимодействия блочной структуры литосферы и отражение этой динамики на спектральных характеристиках сейсмического шума. Проведенный анализ расширяет представления о процессах, происходящих в структуре геоблоков при воздействии внешних астрономических и внутренних тектонических факторов. Показана возможность использования резонансных свойств геоблоков для анализа их состояния. Предложенная математическая модель взаимодействия геоблоков может быть использована для формирования прогнозных критериев и систематических поправок в расчетах сейсмической локации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойствах дискретности горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1982. – №12.
2. Собисевич Л.Е., Собисевич П.Л. Волновые процессы и резонансы в геофизике. М.: ОИФЗ РАН, 2001. 297 с.

© С.А. Ефимов, 2013