

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

Андрей Павлович Григорюк

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sccc.ru

Валерий Викторович Ковалевский

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор наук, заместитель директора, тел. (383)330-71-96, e-mail: kovalevsky@sccc.ru

Людмила Петровна Брагинская

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий программист, тел. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

В работе представлены результаты исследования параметров поляризации сейсмических волн в ходе вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны. Установлена связь параметров поляризации с вариациями напряженного состояния геологической среды, вызванными землетрясением.

Ключевые слова: вибросейсмический мониторинг, сейсмическая анизотропия, поляризация сейсмических волн.

STUDY OF POLARIZATION OF SEISMIC WAVES DURING THE VIBROSEISMIC MONITORING

Andrey P. Grigoruk

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sccc.ru

Valeriy V. Kovalevsky

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Deputy Director, phone: (383)330-71-96, e-mail: kovalevsky@sccc.ru

Ludmila P. Braginskaya

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Programmer, phone: (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

The paper presents the results of studying the polarization parameters of seismic waves during the vibroseismic monitoring of the Baikal rift zone. The relationship between the polarization parameters and the variations in the stress state of the geological environment caused by the earthquake is established.

Key words: vibroseismic monitoring, seismic anisotropy, polarization of seismic waves.

Введение

В Сибирском отделении РАН совместными усилиями институтов ИНГГ СО РАН, ИВМиМГ СО РАН, ГС СО РАН, ГИН СО РАН проводятся исследования по развитию методов активной сейсмологии, в частности, созданию метода вибротсейсмического мониторинга сейсмоопасных зон [1].

В отличие от взрывных источников, имеющих дополнительные ограничения по экологическим воздействиям, мощные низкочастотные вибрационные источники типа ЦВ-100 характеризуются высокой стабильностью параметров излучаемых ими сейсмических волн, которая обеспечивается компьютерными системами управления. Возможности вибрационных сейсмических источников позволяют реализовать методы мониторинга свип-сигналом в диапазоне 6.5–10 Гц и монохроматического излучения для обнаружения малых изменений характеристик среды. Построение рядов наблюдений, таких как времена вступления волн и их отношения, разность времен вступления волн, динамических характеристик волн (амплитуд, параметров поляризации, углов выхода) и др., определяемых напряженно-деформированным состоянием среды, позволяет осуществлять постоянный контроль за реологическими свойствами среды.

Результаты сейсмических исследований на Урале [2] и на Сахалине [3] показали, что волновым полям, возбуждаемым при промышленных взрывах и землетрясениях, свойственна изменчивость кинематических и поляризационных характеристик, обусловленная азимутальной анизотропией упругих свойств земной коры. При этом наиболее чувствительными к анизотропии оказываются сдвиговые волны. Согласно современным представлениям одной из вероятных причин сейсмической анизотропии в земной коре является линейная упорядоченность, возникающая в трещиноватой среде под действием ориентированных тектонических напряжений [4]. Следовательно, наблюдая за вариациями параметров поляризации сейсмических волн, проходящих через очаговую область и ее окрестности, можно получать информацию о происходящих изменениях параметров деформируемой среды и ее напряженного состояния.

В настоящей работе исследовались вариации параметров поляризации сейсмических волн в ходе вибротсейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны с использованием вибротисточника ЦВО-100, расположенного в окрестностях г. Бабушкин [5]. Для анализа использовались трехкомпонентные сейсмограммы, зарегистрированные сейсмостанцией Тырган (ТИГ) при излучении свип-сигналов за период с 2004 по 2006 год. Трасса «Вибратор-Тырган» протяженностью 109 км пересекает под острым углом (15 градусов) Боргой-Бугульдейский тектонический разлом (рис. 1).

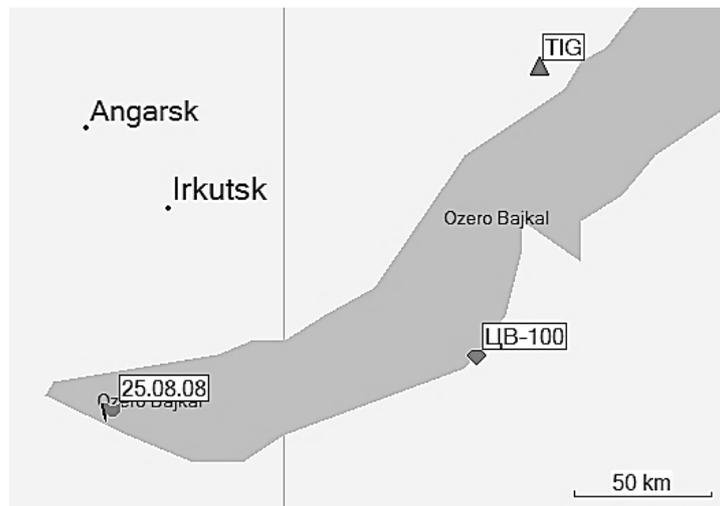


Рис. 1. Трасса «Вибратор-Тырган»

Методы и материалы

Анализ поляризации волн производился по трёхкомпонентным вибрационным сейсмограммам (корелограммам).

Пример вибрационной сейсмограммы приведен на рис. 2. Внизу показана область S-волн, которые использовались для поляризационного анализа. Вертикальными линиями выделен интервал длительностью 0.2 сек, в котором проводились измерения.

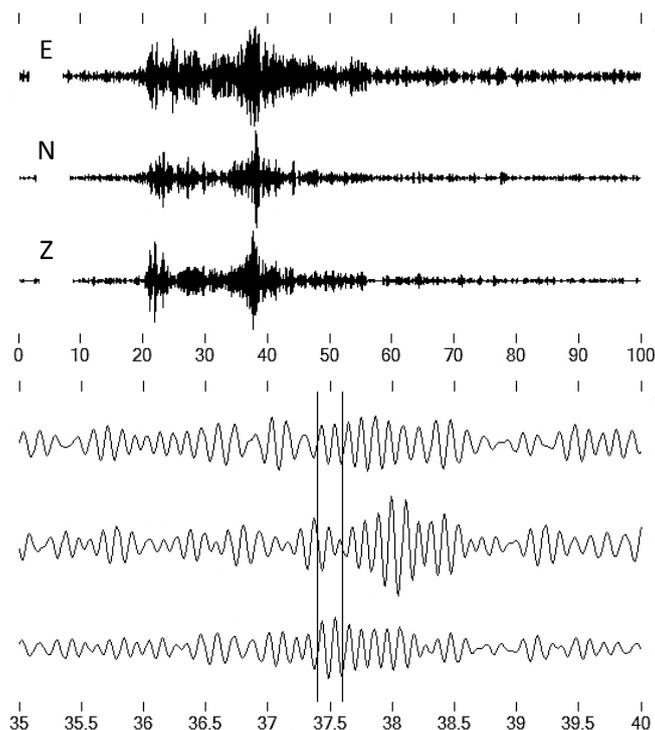


Рис. 2. Пример вибрационной сейсмограммы

Распределение векторов поляризации в пространстве (эллипсоид поляризации) строилось с помощью матрицы ковариации компонент [6]. Данные в заданном временном окне можно представить как набор точек, или радиус-векторов $\vec{x}_i \equiv (x_i, y_i, z_i)$, и поставить задачу найти направление, задаваемое единичным вектором $\vec{p} \equiv (p_x, p_y, p_z)$ поляризации, такое, чтобы сумма квадратов расстояний всех точек от прямой, проведённой в этом направлении, была бы минимальна. Собственные числа и собственные векторы матрицы ковариации исходных данных определяются из уравнения

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Определяемым из (1) вектором поляризации является собственный вектор \vec{p}_1 ковариационной матрицы, соответствующий максимальному собственному числу. Два других собственных вектора, \vec{p}_2 и \vec{p}_3 , дают два ортогональных направления. Соответствующие векторам собственные числа $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ показывают отклонение поляризации от линейной. Коэффициент эллиптичности определяется из выражения

$$e = \sqrt{\frac{3\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}}. \quad (2)$$

Направление главной оси эллипсоида поляризации определяется по компонентам вектора \vec{p}_1 . Азимут в горизонтальной плоскости

$$\Phi = \arctan\left(\frac{p_{1y}}{p_{1x}}\right) \quad (3)$$

и угол выхода (отклонение от вертикали)

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{p_{1x}^2 + p_{1y}^2}}{p_{1z}}\right). \quad (4)$$

Полученные в соответствии с (3) значения углов поляризации для азимутальной плоскости NE приведены на графике рис. 3, а для вертикальных плоскостей NZ и EZ на рис. 4.

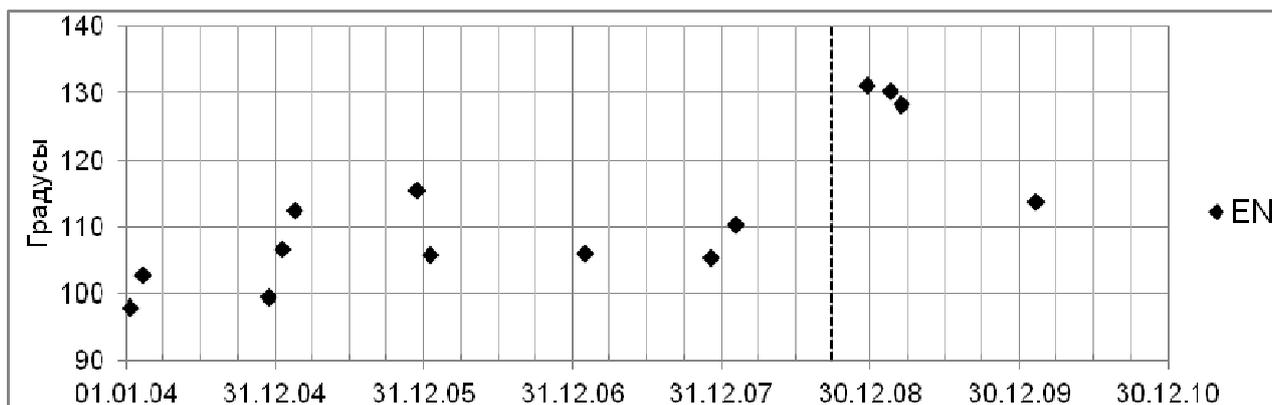


Рис. 3. Значения углов поляризации в азимутальной плоскости

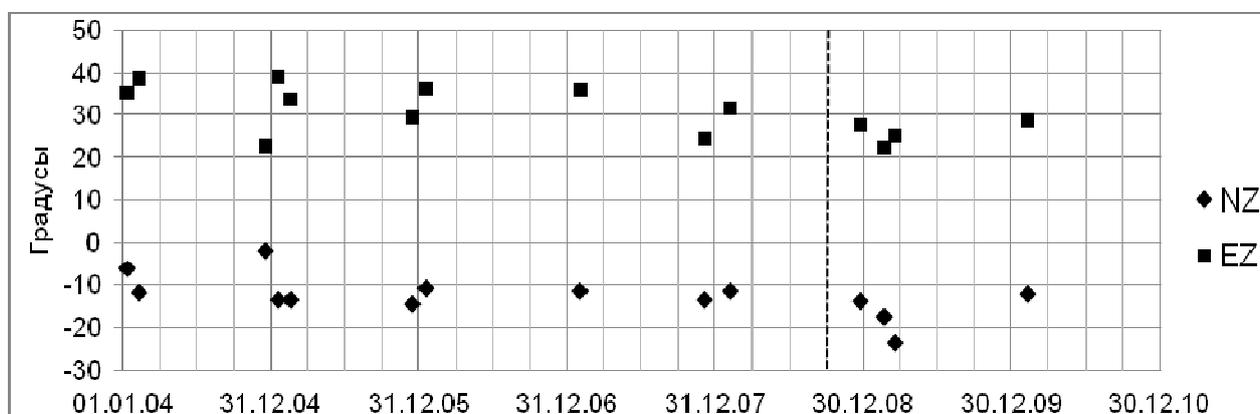


Рис. 4. Значения углов поляризации в вертикальных плоскостях (углы выхода)

На графиках представлены результаты измерений только для зимних сеансов зондирования, во время которых параметры излучения более стабильны из-за промерзания почвы под сейсмовибратором. Вертикальной пунктирной линией отмечена дата, соответствующая Култукскому землетрясению 27 августа 2008 года. Это землетрясение энергетического класса 15.9 является самым мощным в Байкальской рифтовой зоне за рассматриваемый период времени. Эпицентр землетрясения отмечен на карте рис. 1.

На рис. 5 показаны примеры полярограмм для трехкомпонентных вибрационных сейсмограмм, зарегистрированных в периоды до и после Култукского землетрясения. Справа от каждой полярограммы приведены углы поляризации и коэффициенты эллиптичности, рассчитанные по формулам (2) и (3).

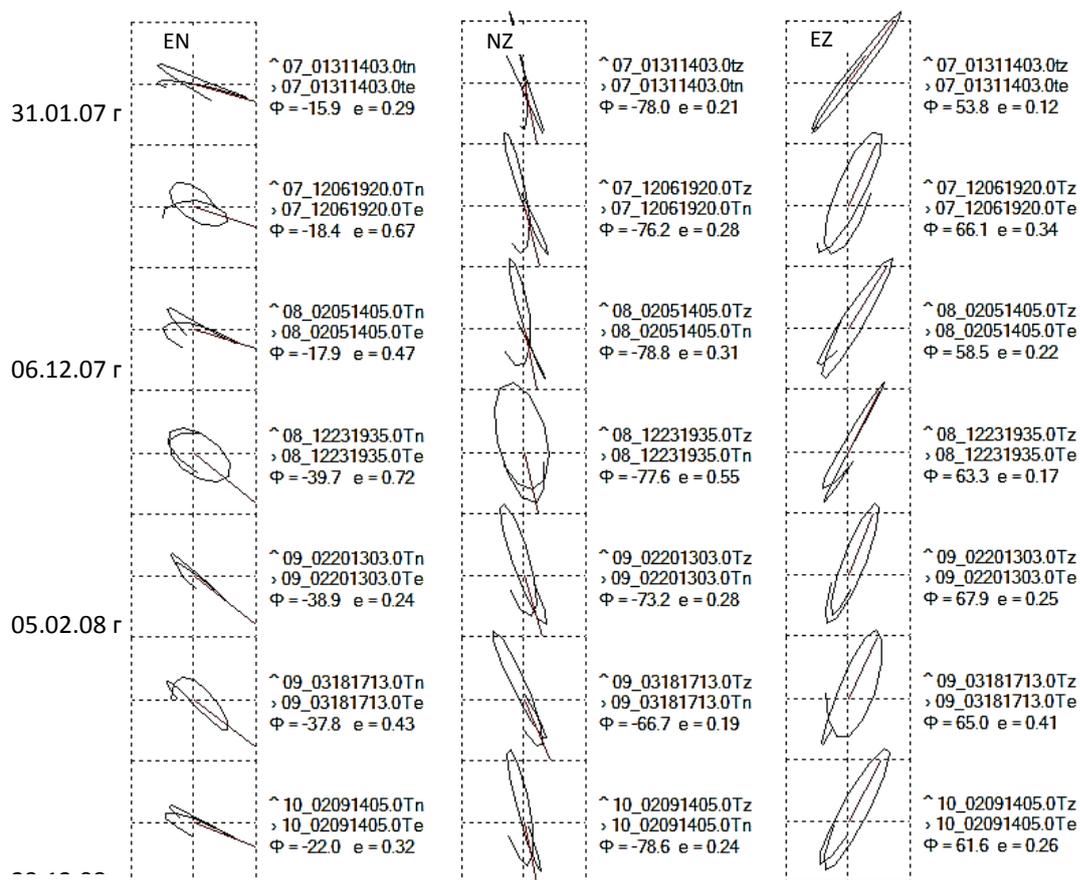


Рис. 5. Примеры полярограмм

Обсуждение

На графике рис. 4 видно, что значения угла поляризации в горизонтальной плоскости в период до землетрясения изменяется в диапазоне 106 ± 7 градусов. Направление, перпендикулярное главной оси поляризационного эллипса в горизонтальной плоскости соответствует азимуту сейсмостанции – вибратор, что является признаком поперечной волны. Сразу после землетрясения 27.08.08 г. угол поляризации скачком увеличился на 22 градуса, а затем возвратился к исходному значению в течение приблизительно одного года.

На полярограммах рис. 5 можно наблюдать изменение угла поляризации в плоскости NE после землетрясения с последующим возвратом к первоначальным значениям. В вертикальных плоскостях NZ и EZ вариации угла поляризации не коррелируют с землетрясением. Коэффициент эллиптичности в плоскостях NE и NZ в среднем возрастает в периоды непосредственно перед и после землетрясения.

Можно предположить, что вариации поля напряжений в результате землетрясения вызвали изменения анизотропных свойств среды, что отразилось на параметрах поляризации сейсмических волн.

Выводы

1. В работе исследованы поляризационные параметры трехкомпонентных вибрационных сейсмограмм, зарегистрированных сейсмостанцией Тырган на расстоянии 109 км от вибратора ЦВ-100. Сейсмограммы регистрировались в ходе вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны на протяжении 2004 – 2010 гг.

2. Установлена связь вариаций параметров поляризации сейсмических волн, возбуждаемых мощным сеймовибратором с изменениями поля напряжений среды в результате землетрясения.

3. Полученный результат позволяет положительно оценивать перспективы мониторинга напряженного состояния геологической среды по вариациям поляризации сейсмических волн, возбуждаемых мощными сейсмическими вибраторами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками // Отв.ред. Г.М. Цибульчик. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Издательства СО РАН, 2004.

2. Кашубин С.Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по ее изучению на Урале и Восточно-Европейской платформе // Екатеринбург: УрО РАН. – 2001. – 182 с.

3. Лунева М.Н., Сафонов Д.А. Сейсмическая анизотропия под Южным Сахалином по параметрам S-волн от местных глубокофокусных землетрясений // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28. – № 5. – С. 96-106

4. Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic // Geophys. J. R. astr. Soc. – 1978. – V. 3. P. 67-496.

5. Татьков Г.И., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д., Толочко В.В., Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий // Отечественная геология. – 2013. – № 3. С. 16–23

6. Jurkevics A. Polarization analysis of three-component array data. Bulletin of the Seismological Society of America, – 1988. – 78(5), p.1725–1743

© А. П. Григорюк, В. В. Ковалевский, Л. П. Брагинская, 2018