

Т. А. Ступина¹✉, Е. В. Цибизова¹, Н. А. Бушенкова¹

Азимутальная анизотропия в мантии по данным анализа расщепления SKS-волн в районе вулкана Таупо

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: StupinaTA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Работа посвящена изучению азимутальной анизотропии в мантии Земли по данным измерений параметров расщепления SKS-волн в районе супервулкана Таупо в Новой Зеландии. Применение полуавтоматического подхода контроля качества позволило по телесейсмическим данным за 2003-2018 гг. сформировать репрезентативный каталог событий, зарегистрированных локальной сетью станций. В дальнейшем это позволило получить результаты, демонстрирующие, что направление поляризации «быстрой» поперечной волны, в основном, параллельно границе субдукции. Временные задержки прихода «быстрой» и «медленной» волн расщепления составило около 1.7 секунд, что указывает на значительное влияние анизотропии в мантии под сетью станций.

Ключевые слова: азимутальная анизотропия, субдукция, SKS-волны

T. A. Stupina¹✉, E. V. Cibizova¹, N. A. Bushenkova¹

Azimuthal anisotropy in the mantle from SKS-wave splitting analysis in the Taupo volcano area

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: StupinaTA@ipgg.sbras.ru

Abstract. This work is devoted to the study of azimuthal anisotropy in the Earth's mantle based on measurements of SKS-wave splitting parameters in the Taupo supervolcano area in New Zealand. The use of a semi-automated approach to quality control made it possible to form a representative catalog of teleseismic events recorded by a local network of stations in 2003-2018. This subsequently made it possible to obtain results demonstrating that the polarization direction of the leading shear wave is mainly parallel to the subduction boundary. The time delays in the arrival of the "fast" and "slow" direction shear waves were about 1.7 seconds, which indicates a significant influence of anisotropy in the mantle beneath the station network.

Keywords: azimuthal anisotropy, subduction, SKS waves

Введение

Изучение динамических процессов, происходящих в зонах субдукции, сопряжено с исследованиями неоднородностей в мантии и остается актуальным по настоящее время. «Молодая» субдукционная зона, сформированная погружением Тихоокеанской плиты под Австралийскую, вызывает большой интерес у многих ученых. Северный остров Новой Зеландии расположен в зоне, где граница между плитами имеет изгиб. Скорость относительного движения плит

уменьшается в этом регионе к югу и в Новозеландском сегменте движение становится параллельным границе плит [1] (рис.1). В желобе Хикуранги к востоку от Северного острова происходит субдукция утолщенного океанического плато Хикуранги. Севернее плато переходит в океаническую плиту средней мощности, субдуцирующую под желоб Кермадек (северное продолжение желоба Хикуранги). На Южном острове субдукция стимулирует появление сдвиговой разломной зоны, включающей систему разломов Марлборо и Альпийский, по которому происходит основная часть относительного движения Австралийской и Тихоокеанских плит [2]. Активная тектоника Северного острова обусловлена влиянием субдукции в желобе Хикуранги, задугового рифтинга в Вулканической Зоне Таупо (ВЗТ) и правосдвиговой разломной зоны на востоке острова (Рис.1). Наблюдается существенное сжатие в аккреционном клине между желобом Хикуранги и восточным побережьем Северного острова. Раскрытие рифта ВЗТ (часть Центрального Вулканического Региона, или ЦВР) продолжается уже, как минимум последние 2-4 миллиона лет, с примерной скоростью от нескольких до 20 мм в год [3]. Около 25 млн лет назад в регионе прекратился спрединг, и началось сдвиговое движение плит, послужившее началом субдукции. На Земле обнаружено всего 2-3 региона с похожей историей развития, и они мало изучены.

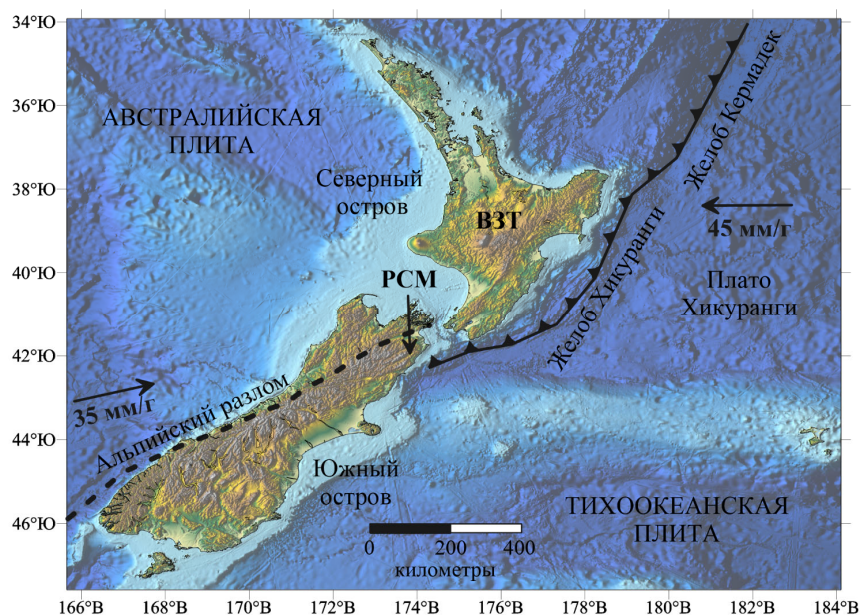


Рис. 1. Региональная тектоническая обстановка Новой Зеландии. РСМ – разломная система Марлборо, ВЗТ – вулканическая зона Таупо

Многочисленные исследования сейсмической анизотропии, как одного из параметров, характеризующих тектонические процессы, активно проводились в различных зонах субдукции в течение нескольких десятков лет и выявили ряд закономерностей изменения поляризации «быстрой» поперечной волны и степени анизотропии среды в зонах субдукции по направлению от желоба к задуговой области [4,5]. В то же время, постоянно пополняющиеся свежими данными

мировые каталоги сильных землетрясений позволяют получать новые решения или уточнять прежние.

Настоящая работа посвящена исследованию азимутальной сейсмической анизотропии в мантии по данным измерений параметров расщепления SKS-волн в районе супервулкана Таупо в Новой Зеландии от телесейсмических событий, зарегистрированных локальной сетью из семи станций в 2003-2018 гг. Результаты исследования показали, что направление поляризации «быстрой» поперечной волны преимущественно параллельно границе субдукции и хорошо согласуется с результатами работ [6, 7, 8], выполненных по независимым данным других станций, расположенных в северной части острова в более ранний период. Временные задержки прихода «быстрой» и «медленной» поперечных волн в совокупности составили 1.7 секунд, что указывает на значительное влияние анизотропии в мантии.

Методы и данные

В обработке были использованы сейсмологические данные с семи однотипных (BFZ, BKZ, HIZ, KHZ, OUZ, QRZ, WPVZ) широкополосных станций Национальной сейсмографической сети Новой Зеландии («New Zealand National Seismograph Network»), находящиеся в открытом доступе через международную сеть FDSNWS [9]. Расположение станций показано на карте (рис. 4). В настоящей работе применялся метод анализа расщепления поперечных волн, основанный на минимизации энергии по трансверсальной компоненте [10], в котором вычислялся азимут (ϕ) поляризации «быстрой» поперечной волны и разность времен (δt) прихода «быстрой» и «медленной» поперечных волн, отражающие характеристики направленности деформаций и степени анизотропии среды.

Используемый метод реализован в процедуре программы «SplitRacer», разработанной в университете им. Гёте Франкфурт-на-Майне [11] и в настоящее время широко применяемой многими научными коллективами. В программном приложении существует возможность задавать двухслойные анизотропные модели и вычислять оценки параметров как для одного события, так и по всем событиям на конкретной станции, выполнять контроль качества выделенной фазы SKS волны.

На первом этапе по данным каталога [9] был сформирован подкаталог из 647 сильных землетрясений с $M_w \geq 6$ и эпицентральными расстояниями 85° - 140° за период с 2003 по 2018 год.

На втором этапе к сейсмическим 100-секундным трехкомпонентным записям применялся односекундный фильтр низких частот и «ресемплинг» до 20 Гц с целью понижения расчетного времени. Далее по таблице времен, сформированной в приложении «TauP» [12] для модели «Iasperi91», выделенные фазы SKS-волн анализировались на часовых и 100-секундных записях по нескольким сейсмическим событиям с целью подбора удовлетворительных параметров (полосовой фильтр в диапазоне 4-50 секунд, соотношение сигнал/шум более 2.5 в диапазоне 20 секунд за 5 секунд до теоретической фазы) для дальнейшей автоматизации процесса. Во избежание интерференции, фазе SKS на протяжении 10

секунд не должны предшествовать вступлению других фаз. Временное окно устанавливалось в диапазоне 25 секунд и устанавливалось оно за 5 секунд до теоретического времени вступления фазы. Далее определялись четкие вступления фаз на радиально-трансверсально преобразованных горизонтальных компонентах и оценивалась эллиптическая форма траектории движения частиц, указывающая на наличие расщепления. На Рисунке 2 приведен пример обработки записи землетрясения станции BKZ.

На третьем этапе к отобранному подкаталогу для каждой станции применялся статистический анализ, включая построение гистограмм распределения разности между теоретическим и вычисленным обратным азимутом с целью исключения дезориентированных со временем приемников или их коррекции. Единичные события с большим отклонением были исключены из дальнейшей обработки. В результате, например, из подкаталога для станции BKZ было отобрано 87 землетрясений, удовлетворяющих установленным выше параметрам.

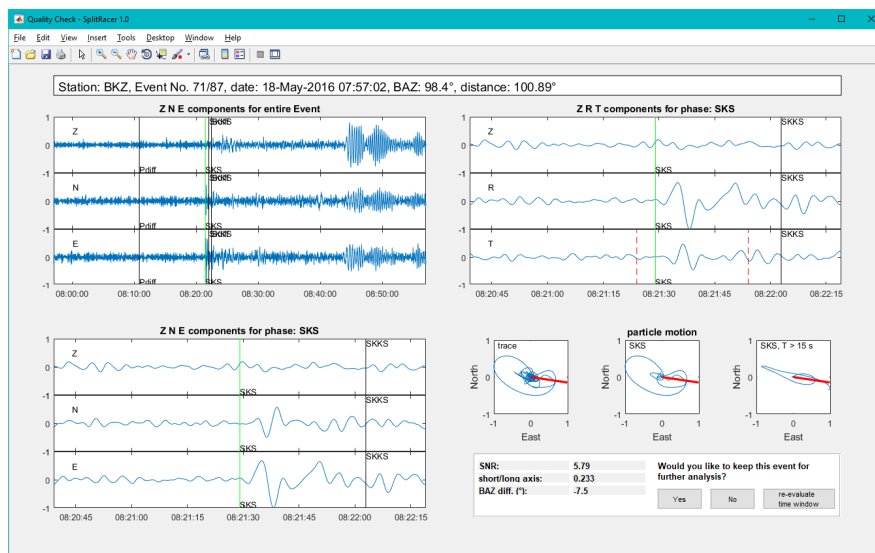


Рис. 2. Графический интерфейс обработки записи сейсмического события на станции BKZ.

На четвертом этапе расчет параметров расщепления осуществлялся сеточным методом по переменным (ϕ , δt) с шагом (1° , 0.1 сек.) и минимизированием энергии по трансверсальной компоненте в диапазоне от 0° до 180° и от 0 до 4 секунд, соответственно. Качество полученного решения оценивалось в совокупности через размер 95% доверительного интервала, вычисленного на основе F-теста двухпараметрической модели, относительную величину снижения энергии («energy reduction», более 85%) и по наличию трансформации траектории движения частиц из эллипса в линию. На Рисунке 3 приведен пример диалогового окна программы вычисления параметров расщепления для одного события, записанного станцией BKZ.

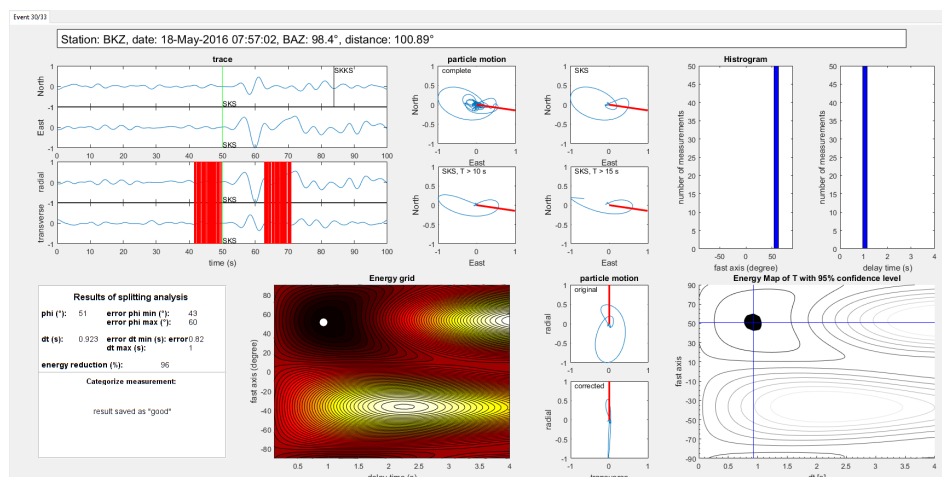


Рис. 3. Графический интерфейс анализа расщепления поперечных волн на 100-секундной записи станции BKZ.

На пятом этапе параметры расщепления вычислялись одновременно по всем событиям с минимизацией суммарной энергии по трансверсальной компоненте.

Результаты и обсуждения

В результате применения выше описанной методики и многокритериального подхода к отбору данных, на семи станциях было обработано 4 529 сейсмограмм за период с 2003 по 2018 год, из которых только на 509 удалось выделить расщепление SKS-волн.

Таблица 1

Значения параметров расщепления под станциями

Станции	Параметр 1			Параметр 2		
	ϕ , °	$\phi_{\min}$, °	$\phi_{\max}$, °	δt , сек.	$\delta t_{\min}$, сек	$\delta t_{\max}$, сек
BFZ	38	33	41	2.20	1.8	2.4
BKZ	24	22	26	1.6	1.5	1.8
HIZ	38	29	46	0.82	0.62	1.1
KHZ	33	27	37	1.1	0.92	1.3
OUZ	64	52	79	0.72	0.41	1
QRZ	20	13	29	2.4	1.6	3.2
WPVZ	26	21	30	1.4	0.92	1.9

Значения параметров расщепления, азимут поляризации ϕ «быстрой» волны и его границы 95% доверительного интервала ($\phi_{\min}$, $\phi_{\max}$), степень анизотропии δt и ее границы 95% доверительного интервала ($\delta t_{\min}$, $\delta t_{\max}$) под каждой станцией представлены в табл. 1. Пространственное распределение параметров расщепления, с явно выделяющимся параллельным субдукционной зоне направлением, показано на карте (рис. 4), где пунктирная линия обозначает правосдвиговую разломную зону, зубчатая линия - положение Австралийско-Тихоокеанской зоны субдукции с направлением погружения в сторону «зубцов». В результате

проведенного исследования азимутальной анизотропии в мантии по вычисленным параметрам расщепления SKS-волн в районе супервулкана Таупо в Новой Зеландии получено, что преобладающее направление поляризации «быстрой» поперечной волны параллельно границе субдукции (рис. 4) и согласуются с результатами из работ [6,7,8] по другим станциям. Временные задержки прихода поперечных волн по «быстрому» и «медленному» направлениям составили порядка 1.7 секунд (средневзвешенная оценка по сети станций), что указывает на значительное влияние анизотропии, обусловленной ориентацией кристаллической решетки оливина в верхней мантии вследствие взаимодействия погружающегося слэба с окружающей мантией.

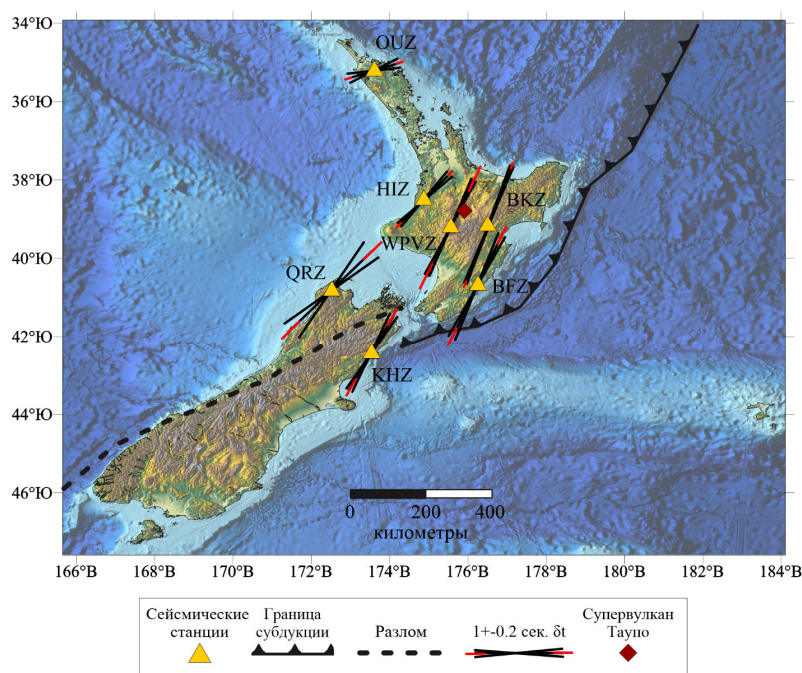


Рис. 4. Распределение параметров расщепления SKS-волн для каждой станции, задействованной в исследовании. Длина черных линий - значение параметра δt , угол наклона линии - параметр ϕ . Дополнительные черные линии – границы 95% доверительного интервала для ϕ . Красная линия - расширение δt до границ 95% доверительного интервала.

Заключение

Полученные в ходе исследования результаты позволяют предполагать, что анизотропия, обнаруженная под регионом супервулкана Таупо (Новая Зеландия) по SKS-волнам, обусловлена ориентацией кристаллической решетки оливина в верхней мантии вследствие взаимодействия погружающегося слэба Тихоокеанской плиты с окружающей мантией. Доминирующее направление поляризации «быстрой» поперечной волны параллельно границе субдукции, что подтверждается работами других ученых. Временные задержки прихода поперечных волн по «быстрому» и «медленному» направлениям составили порядка 1.7 секунд, что указывает на значительное влияние анизотропии в верхней мантии.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке ФНИ FWZZ-2022-0017.

Авторы выражают благодарность А.А. Яковлеву и А.А. Баланкову за работу с программными кодами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. DeMets C., R. G. Gordon, D. F. Argus, S. Stein. Current plate motions // *Geophysical Journal International*. – 1990. - Vol. 101. - № 2. - P. 425–478.
2. Van Dissen Russell, Robert S. Yeats. Hope fault, Jordan thrust, and uplift of the Seaward Kaikoura Range, New Zealand // *Geology*. – 1991. - Vol. 19.- №4. - P. 393-396.
3. Villamor Pilar, Kelvin Berryman. A late Quaternary extension rate in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, derived from fault slip data // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. – 2001. - Vol. 44. - № 2 - P. 243-269.
4. Long M.D., Silver P.G. Mantle flow in subduction systems: The subslab flow field and implications for mantle dynamics // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. –Vol. 114. – P. B10312.
5. Paczkowski Karen. Dynamic Analysis of Modifications to Simple Plate Tectonic Theory // *ProQuest Dissertations and Theses*. – 2012. - № AAT 3535406. - ISBN 9781267856869. – 185 p.
6. Klosko E. R. et al. Upper mantle anisotropy in the New Zealand region // *Geophys. Res. Lett.* - 1999. - Vol. 26. – P. 1497 –1500.
7. Marson-Pidgeon, K., M. K. Savage, and K. Gledhill. Seismic anisotropy beneath the lower half of the North Island, New Zealand // *Journal of Geophysical Research*. – 1999 – Vol. 104. - № 20. – P. 277 – 286.
8. Audoine E., M. K. Savage, and K. Gledhill. Anisotropic structure under a back arc spreading region, the Taupo Volcanic Zone, New Zealand // *Journal of Geophysical Research*. – 2004 – Vol. 109. – № B11. – P. 305 - 326.
9. Сейсмические данные // *GeoNet Aotearoa New Zealand Seismic Digital Waveform Dataset*. GNS Science. – 2021. - <https://doi.org/10.21420/G19Y-9D40>.
10. Silver Paul G., W. Winston Chan. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation // *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. – 1991. - Vol. 96. - № B10. – P. 429 – 454.
11. Reiss Miriam Christina and Rumpker Georg. SplitRacer MATLAB Code and GUI for Semiautomated Analysis and Interpretation of Teleseismic Shear-Wave Splitting // *Seismological Research Letters*. – 2017. - Vol. 88. - № 2A. – P. 392 – 409.
12. Crotwell H. Philip, Thomas J. Owens, Jeroen Ritsema. The TauP Toolkit Flexible Seismic Travel-time and Ray-path Utilities // *Seismological Research Letters*. – 1999. - Vol. 70. - № 2. - P. 154-160.

© Т. А. Ступина, Е. В. Цибизова, Н. А. Бушенкова, 2025