
НАШИ ГОСТИ

УДК 550.34; 031.1 (479.24)

DOI: 10.23671/VNC.2016.3.20837

СЕЙСМИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН НА ПРИМЕРЕ ГАДЖИГАБУЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 10 ФЕВРАЛЯ 2014 Г. С $M_L = 5,8$

© 2016 И.Э. Казымов, к.г.-м.н., С.Э. Казимова, к.г.-м.н.

Национальная Академия Наук Азербайджана, Республиканский Центр Сейсмологической Службы, Азербайджан, 1001, Баку, ул. Гусейн Джавида, 123,
e-mail: sabina.k@mail.ru

В статье представлен анализ параметров расщепленных поперечных волн от глубокого ($h = 56$ км) землетрясения, произошедшего в пределах Нижнекуринской впадины 10 февраля 2014 г. с $M_L = 5,8$. Пространственный анализ волновых форм ведется с использованием 3-компонентных цифровых записей сигнала. Для выделенных участков 3-компонентной записи в программе «DIMAS» строится трехмерный график траектории движения частиц и проекции траектории движения на плоскости NE, NZ, EZ. Установлен эффект двулучепреломления, когда поперечная волна расщепляется на две (S_1 и S_2), каждая из которых имеет свою поляризацию и скорость для широкополосных трехкомпонентных записей (VNE, VNN, VNZ) 4-х сейсмических станций («QUB», «GAN», «LKR», «GOB»). Это дает возможность изучения мелко-масштабных деформаций для лучшего понимания динамических процессов и свойств среды с глубиной.

Ключевые слова: поляризация, анизотропия, поперечные волны, землетрясение.

Введение

Впервые идея широкого использования поляризации волн для увеличения эффективности сейсморазведочных и сейсмологических исследований была выдвинута в 50-х годах Г.А. Гамбурцевым. Им был предложен новый вид корреляции волн – азимутально-фазовая корреляция, основанная на прослеживании фаз сейсмических волн в функции ориентировки в пространстве составляющих колебаний при неизменном положении точек наблюдения. Развитие этих исследований привело к созданию азимутального метода сейсмических наблюдений [Гальперин, 1977]. Были разработаны способы обработки азимутальных сейсмограмм и определения параметров поляризации сейсмических волн. Данный подход исследования анизотропии поперечных волн в последнее время в своих работах применил профессор Университета Миссури Э. Сандвол. Поляризационный анализ успешно применялся в разное время при анализе волнового поля, возбуждаемого искусственными [Заалишвили, 1986, 2000] и естественными [Zaalishvili et al., 2016] источниками, а также при решении задач локализации сейсмических событий в условиях ограниченных данных [Заалишвили, Мельков, 2013].

Целью данной статьи являлось определение направления смещения частиц среды и параметров эллиптически-поляризованных колебаний, оценка точности определения направления вектора движения частиц и выявление расщепленных поперечных волн на примере глубокого ($h = 56$ км) землетрясения произошедшего

в пределах Нижнекуринской впадины 10 февраля 2014 г. с $M_l = 5,8$. Исследование проводилось на программе «DIMAS».

Описание программы «DIMAS»

Программа DIMAS (**D**isplay, **I**nteractive **M**anipulation and **A**nalysis of **S**eismograms) предназначена для детальной обработки и визуального анализа цифровых сейсмических сигналов, поступающих с различных систем сбора [Дрознин, Дрознина, 2004]. Данная программа позволяет пользователю как проводить комплексную обработку и анализ сейсмического сигнала, так и оценивать основные параметры землетрясений. Отвечает повышенным требованиям работы в реальном режиме времени на системах сбора сейсмометрической информации.

В качестве входного файла используется «SAC» формат. Традиционная ориентация каналов инструмента:

Z-----Dip=90, Azimuth = 0
 N-----Dip=0, Azimuth = 0
 E-----Dip = 0, Azimuth = 90

Пространственный анализ волновых форм ведется с использованием 3-хкомпонентных цифровых записей сигнала. Для выделенных участков 3-хкомпонентной записи в программе строится трехмерный график траектории движения частиц и проекции траектории движения на плоскости NE, NZ, EZ. При этом эффект объемной траектории создается за счет вращения с помощью функциональных клавиш, а проекции на соответствующие плоскости получаются путем разворота объемной фигуры на соответствующие углы. В программе предусмотрено исследование поляризационных характеристик сигнала [Етирмишли, Казымов, 2007; Етирмишли и др., 2007], а также графическое отображение азимутов и углов выхода осей поляризации сейсмической волны на сетке Вульфа для заданного интервала времени.

Поляризация сейсмических волн

На рис. 1 показан пример эллиптической поляризации поперечной волны в трехмерном пространстве. Эллиптически-поляризованное колебание в общем случае возникает при сложении двух взаимно перпендикулярных линейно-поляризованных колебаний (гармонических). Форма эллипса поляризации и его ориентировка в плоскости существенно зависят от параметров интерферирующих колебаний.

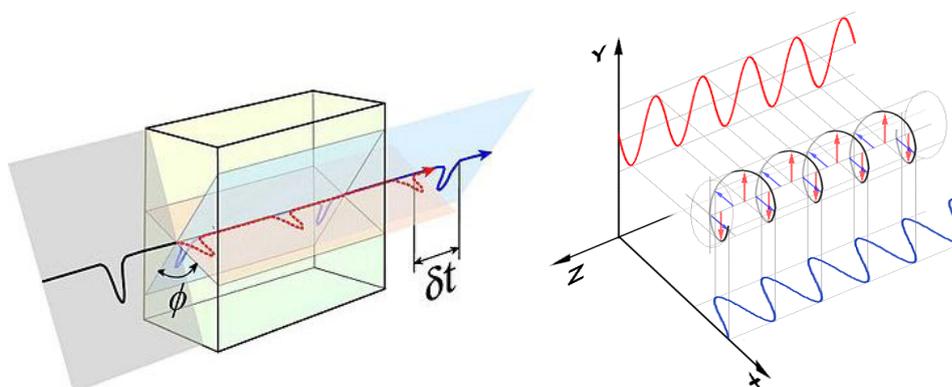


Рис. 1. Пример расщепления и эллиптической поляризации поперечной волны в трехмерном пространстве.



Рис. 2. Эпицентр Гаджигабульского землетрясения 10 февраля 2014 г. с $M_l = 5,8$.

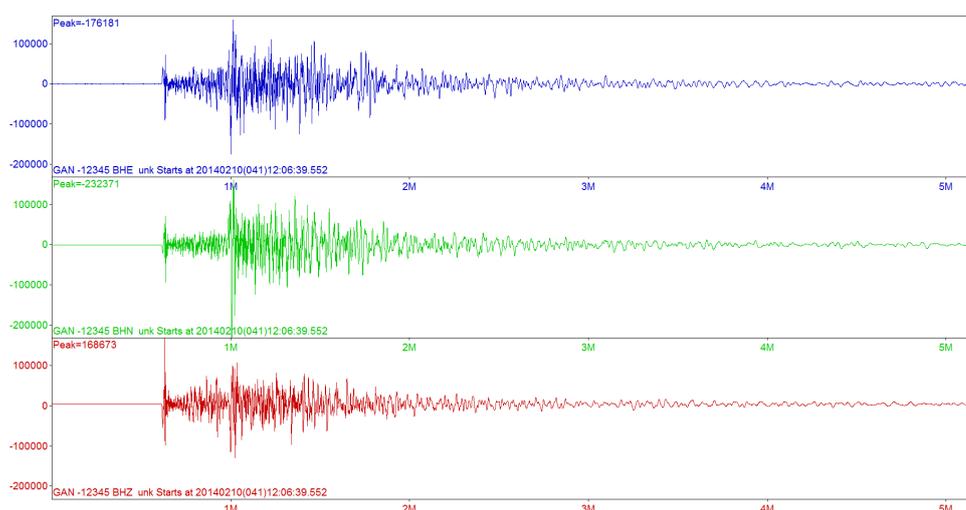


Рис. 3. Пример трехкомпонентной записи Гаджигабульского землетрясения 10 февраля 2014 г. на станции «GAN»

Не останавливаясь здесь на способах представления траекторий, которые будут описаны подробно ниже, рассмотрим поляризацию основных типов волн.

Как было сказано выше исследования проводились на примере одного из самых сильных землетрясений, произошедших на территории Азербайджана за последние 10 лет – Гаджигабульского (10 февраля 2014 г.) с $M_l = 5,8$. Были выбраны широкополосные трехкомпонентные записи (BHE, BHN, BHZ) 4-х сейсмических станций («QUB», «GAN», «LKR», «GOB») так чтобы, обеспечить полный азимутальный охват (рис. 2, 3).

С целью выбора интервала поперечных волн для каждой станции была построена спектрограмма (рис. 4). Как видно на рисунке максимальные значения по частоте характерны для станции «GOB», однако по интенсивности распределения волны выделена станция «QUB». Затухание поперечной волны для станций «QUB»,

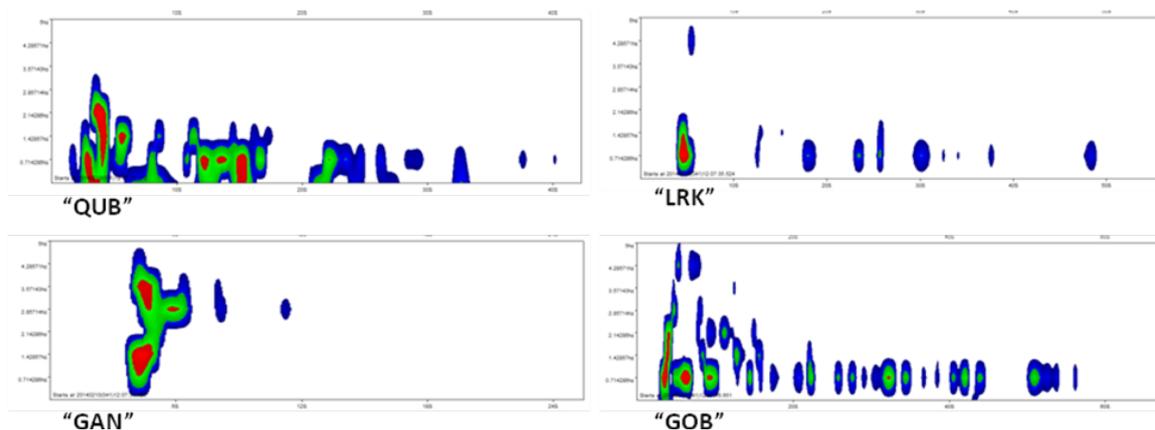


Рис. 4. Спектрограммы поперечных волн исследуемых станций

«LKR» и «GOB» колеблется в интервале 40–60 с., тогда как для станции «GAN» волна затухает на 12 с. записи.

На рис. 5–8 представлены азимутальные сейсмограммы, построенные в горизонтальной плоскости с шагом по азимуту в 2° и отсчетом от севера в интервале S-волн, проекция движения частиц в трехмерном пространстве и сейсмограммы трехкомпонентной записи.

При прохождении поперечных волн через анизотропный слой, возникает эффект двулучепреломления, т. е. поперечная волна расщепляется на две (S_1 и S_2), каждая из которых имеет свою поляризацию и скорость. Нелинейная поляризация волн S обусловлена наложением нескольких колебаний. В том случае, когда анизотропия вызвана направленной трещиноватостью, вектор смещения волны S_1 оказывается параллельным плоскости трещин и, определяя его поляризацию, мы в состоянии определить направление трещин [Гальперин, 1977; Заалишвили, 2000].

Таким образом, для оценки волновых параметров на азимутальных сейсмограммах выделяются S_1 и S_2 фазы и их следующие характеристики: 1) время вступления t_{S1} , t_{S2} ; 2) временной интервал Δt_{S12} , включающий обе волны.

Как видно на рисунках быстрая и медленная S-волны хорошо выделяются в волновом поле, их векторы поляризации взаимно-ортогональны. Последующие волны имеют значительно меньшие амплитуды, и их азимуты близки к азимуту медленной волны S_2 . Время задержки между первой и второй фазой поперечной волны для станции «QUB» равно 15 сек. с ориентацией векторов поляризации вдоль азимутов 145° и 50° , для станции «GAN» – 1,5 с., для станции «LRK» – 0,5 с., для станции «GOB» – 1,0 с. Перед вступлением S_1 не отмечаются поперечные колебания с большим периодом. Сравнивая азимутальные сейсмограммы можно отметить относительную неоднородность на станциях «QUB» и «GOB», что связано с тектонической неоднородностью в данных зонах. Если рассмотреть распределение коэффициента Пуассона на разных глубинах, то можно заметить максимальную неоднородность на всех интервалах глубин в восточной части республики, охватывающая зоны расположения рассматриваемых нами станций (рис. 9) [Етирмишли, Казымова, 2012], что четко отражается на азимутальных сейсмограммах.

На сейсмограмме поперечных волн были выделены 4 интервала и построены траектории движений частиц в трехмерном пространстве. Как видно на рисунках траектории движений частиц в трехмерном пространстве для всех станций пред-

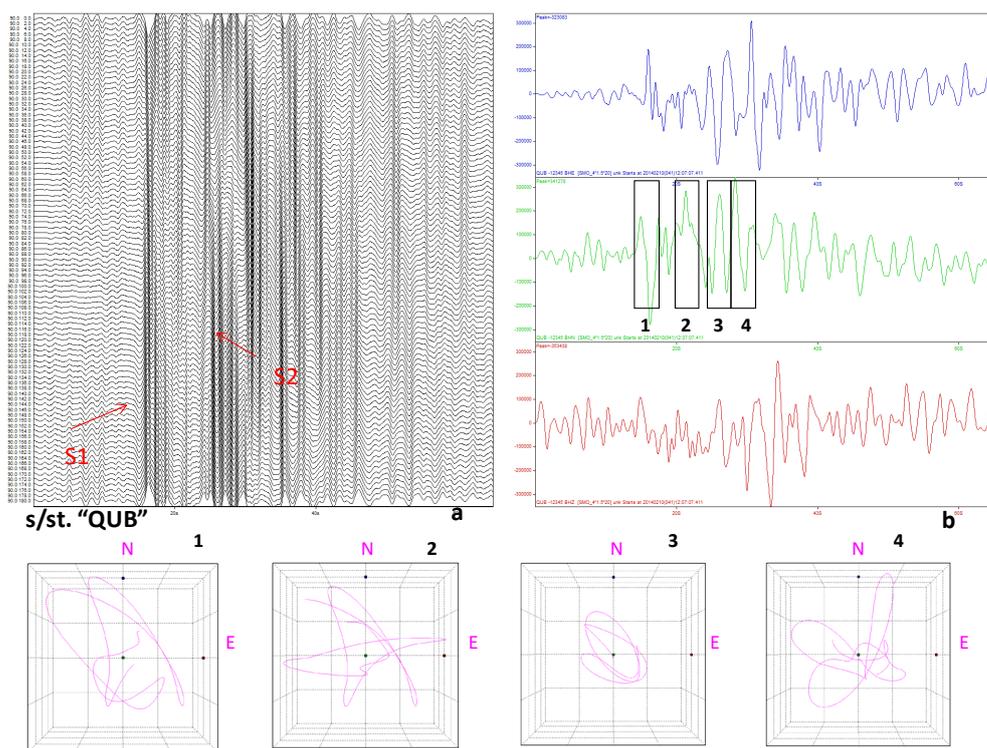


Рис. 5. Азимутальная сейсмограмма построенная в горизонтальной плоскости с шагом по азимуту в 2° и отсчетом от севера в интервале S-волн на станции «QUB». Быстрая (S_1) и медленная (S_2) волны указаны стрелками. Траектория движения частицы в трехмерном пространстве на станции «QUB»

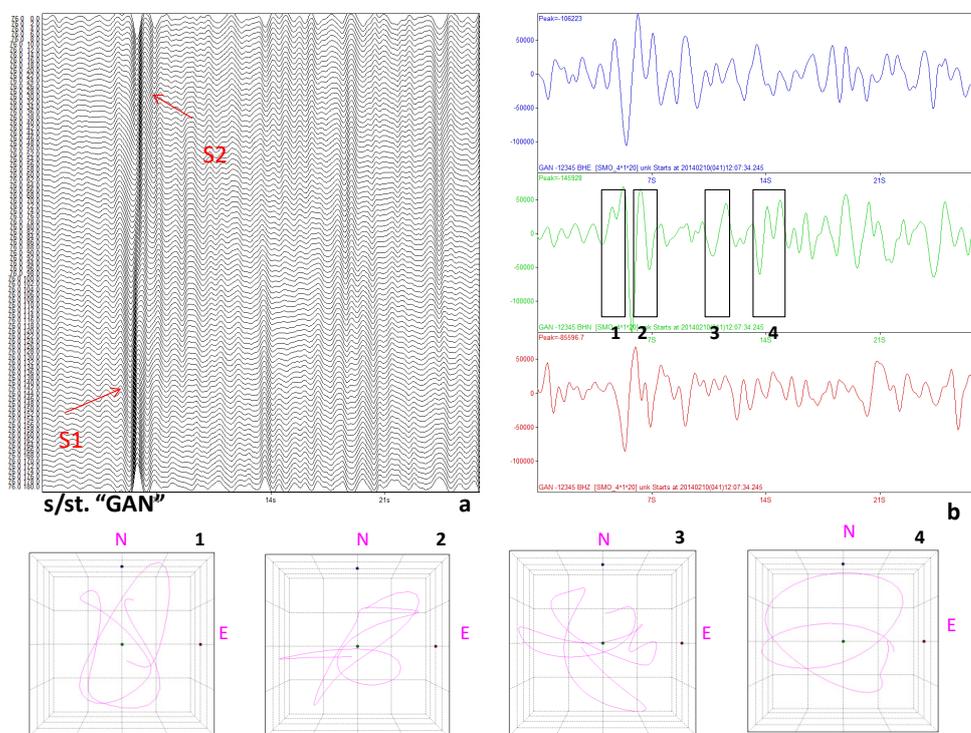


Рис. 6. Азимутальная сейсмограмма построенная в горизонтальной плоскости с шагом по азимуту в 2° и отсчетом от севера в интервале S-волн на станции «GAN». Быстрая (S_1) и медленная (S_2) волны указаны стрелками. Траектория движения частицы в трехмерном пространстве на станции «GAN»

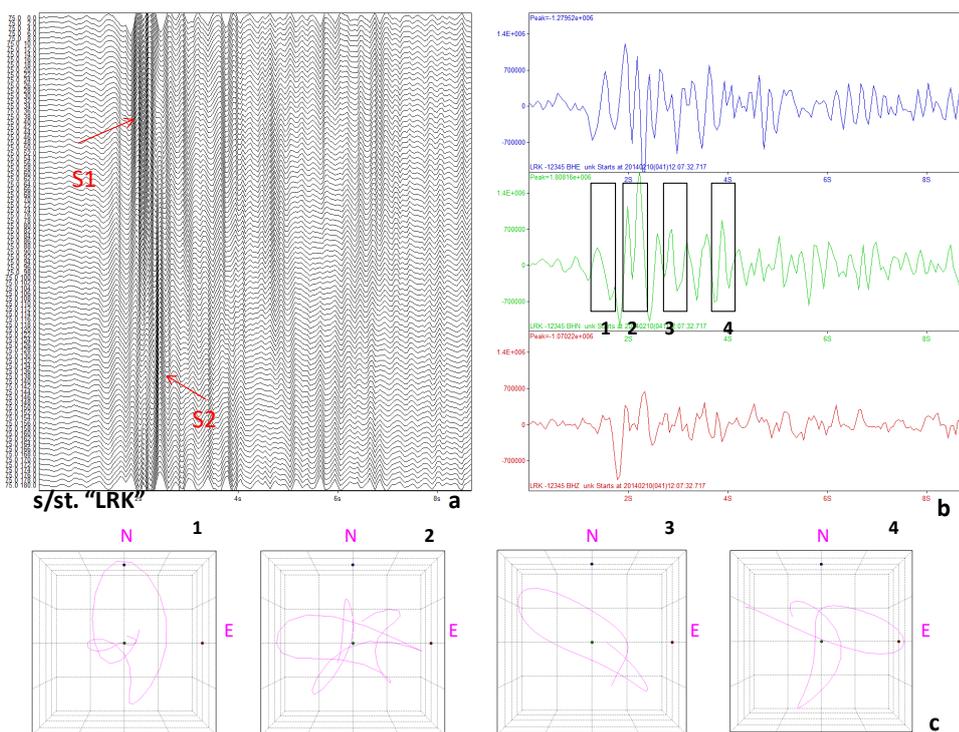


Рис. 7. Азимутальная сейсмограмма построенная в горизонтальной плоскости с шагом по азимуту в 2° и отсчетом от севера в интервале S-волн на станции «LRK». Быстрая (S_1) и медленная (S_2) волны указаны стрелками. Траектория движения частицы в трехмерном пространстве на станции «LRK»

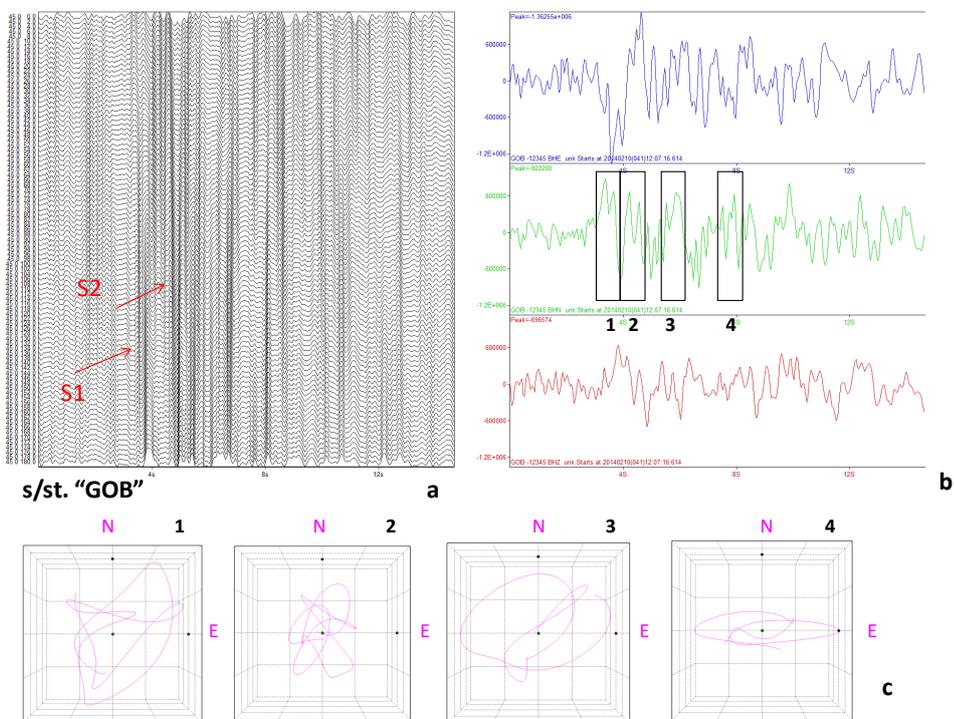


Рис. 8. Азимутальная сейсмограмма построенная в горизонтальной плоскости с шагом по азимуту в 2° и отсчетом от севера в интервале S-волн на станции «GOB». Быстрая (S_1) и медленная (S_2) волны указаны стрелками. Траектория движения частицы в трехмерном пространстве на станции «GOB»

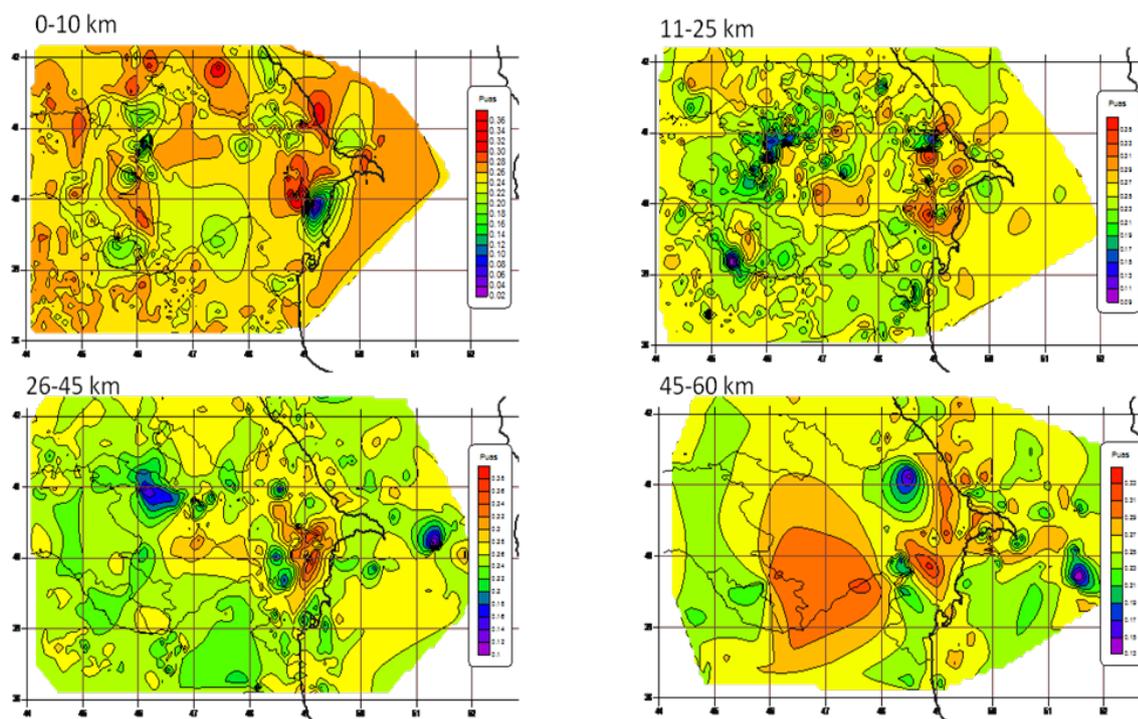


Рис. 9. Распределение коэффициента Пуассона на разных интервалах глубин

ставлены эллипсами, однако в последующем интервале поляризации волн S_1 и S_2 взаимоперпендикулярны друг другу, т. е. колеблются в разных плоскостях. Далее на третьем и четвертых интервалах данная картина повторяется. Данный тип траектории позволяет выделить фазы S_1 и S_2 поперечных волн. А так как вектор смещения волны S_1 оказывается параллельным плоскости трещин, определяя его поляризацию, мы в состоянии определить направление трещин [Лунева, 2008]. Только начальная часть записи волн S_1 менее интерференционна, поскольку интерферирующие волны, как правило, смещены во времени друг относительно друга. Расщепление поперечной волны максимально при распространении волны параллельно плоскости слоистости. В тот момент, когда волны S_1 и S_2 , распространяясь с разными скоростями, смещаются во времени относительно друг друга и, интерферируя между собой, могут образовать колебание, поляризованное по эллипсу. Характер и параметры эллипса будут изменяться в зависимости от условий наложения волн. Данное явление четко проявляется на 3-х и 4-х временных интервалах почти на каждой станции.

Таким образом, можно отметить, что наблюдаются значительные различия в поведении волновых параметров в зависимости от положения станции и глубины. Максимальные изменения характерны для интервала глубин 40–56 км, а также 15–25 км.

Продольные волны. Простая продольная волна, регистрируемая как на дневной поверхности, так и во внутренних точках среды вне интерференции с другими волнами, поляризована линейно. Это значит, что направление вектора смещения сохраняется неизменным, а его величина может изменяться, т. е. частицы среды колеблются около положения равновесия. Данное явление отчетливо проявляется на значениях азимутальных углов продольных волн на исследуемых станциях. Как видно на рис. 10 для станции «QUB» установлено значение азимутального угла

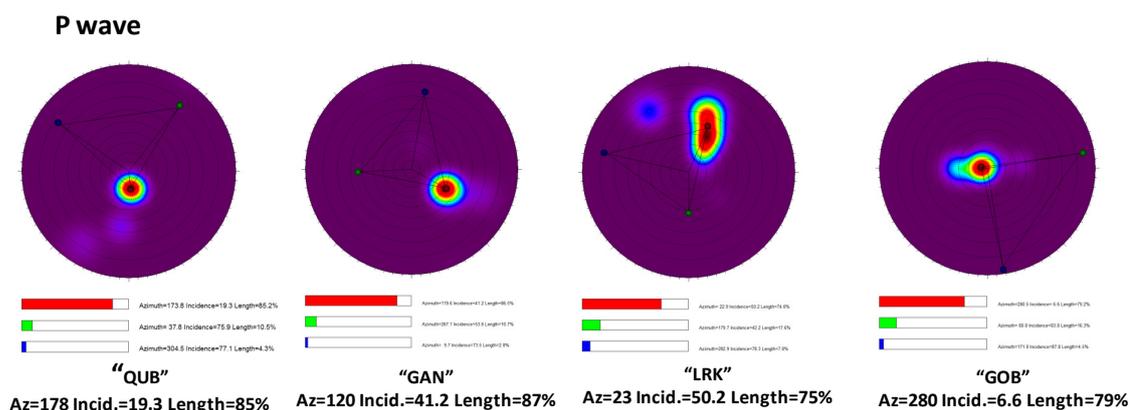


Рис. 10. Пример определения угла выхода продольной сейсмической волны и азимута на сейсмический источник. На сетке Вульфа отображены три главные оси виртуального эллипсоида поляризации. Направление наибольшей оси дает азимут на источник.

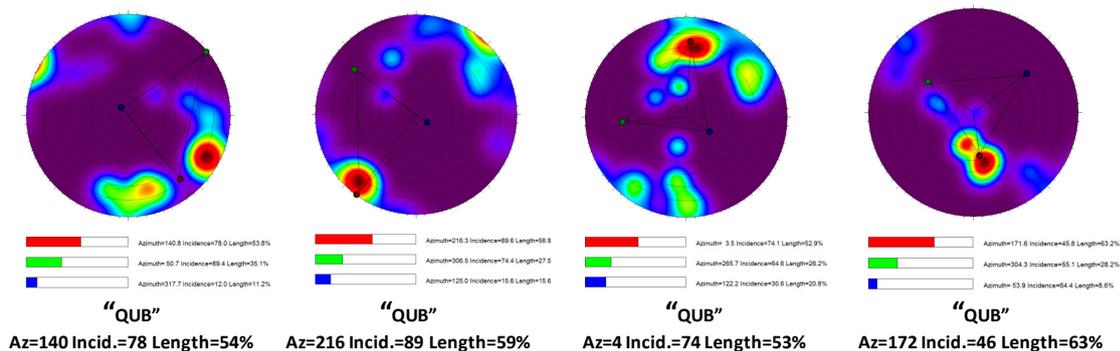
178°, для станции «GAN» – 120°, для станции «LRK» – 23°, для станции «GOB» – 280°, т.е. полностью соответствует азимутальному направлению от рассматриваемого землетрясения на каждую станцию. Угол выхода продольной волны колеблется в интервале 6,6–50,2°.

Для линейно-поляризованного колебания характерны сохранение формы записи и синфазность колебаний в не зависимости от ориентировки составляющих в пространстве. Характер и поляризация продольной волны не зависят от источника и действующих в нем сил. Поэтому в каждой отдельной точке наблюдения характер поляризации волны P, вызванной землетрясением, будет одинаковым и не может дать сведения об источнике.

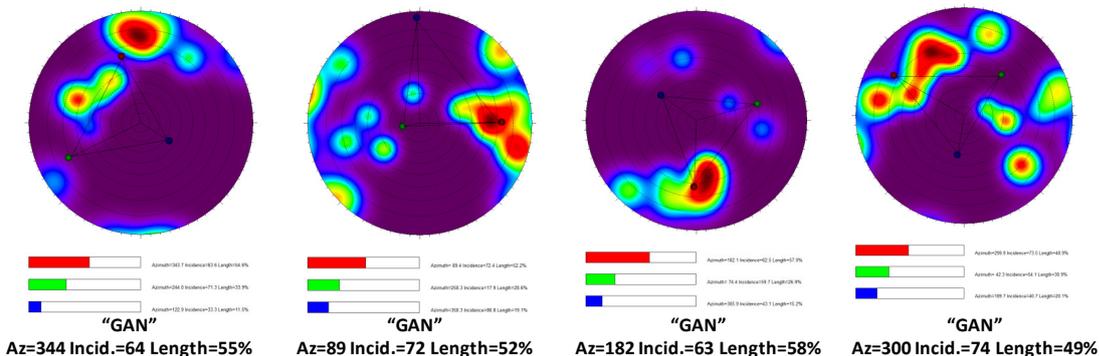
Поперечные волны. При вертикальной оси симметрии и источниках с горизонтально действующей силой в направлении, перпендикулярном действию силы, будут распространяться поперечные волны SH, поляризованные горизонтально, т.е. параллельно силе. Эти волны представляют особый интерес, так как при их распространении в осесимметричных средах на границах раздела не возникают обменные волны, и волновое поле отличается сравнительной простотой. Поэтому на использовании SH основан метод поперечных отраженных волн. Для этих волн характерно, что направление движения частиц изменяется с изменением направления действия сил. Волны SV поляризованы преимущественно в вертикальной плоскости, и они в отличие от волн SH возбуждаются источниками различных типов [Лунева, Ли, 2006; Лунева, 2009].

Как видно на рис. 11 для станции «QUB» значение азимутального угла первой поперечной волны составило 140°, а угол выхода 78°, однако на следующем участке волновой записи значение азимутального угла составило 216°, а угол выхода 89°. На третьем участке волновой картины значение азимутального угла резко меняется и равно 4°, и далее вновь перемещается в третью декаду и составили 172°. Подобная картина наблюдается и для станций «GAN» (азимутальные углы – 344°, 89°, 182°, 300°), «LRK» (294°, 57°, 340°, 229°) и «GOB» (145°, 369°, 96°, 255°).

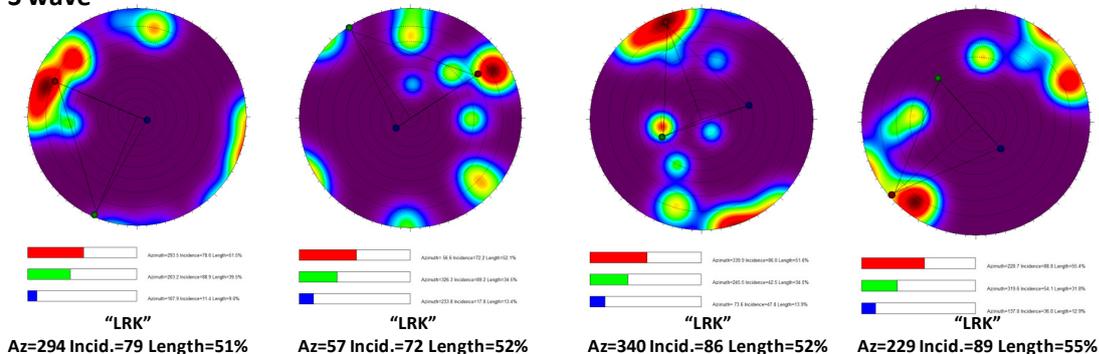
S wave



S wave



S wave



S wave

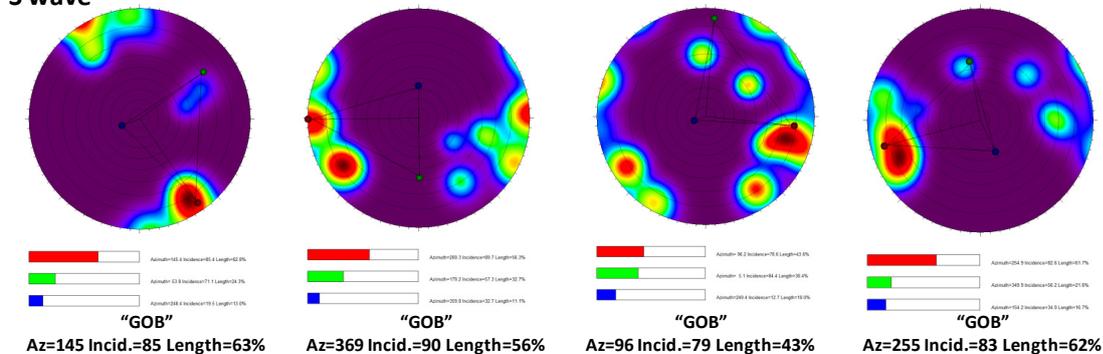


Рис. 11. Пример определения угла выхода поперечной сейсмической волны и азимута на сейсмический источник. На сетке Вульфа отображены три главные оси виртуального эллипсоида поляризации. Направление наибольшей оси дает азимут на источник.

Результат

Полученные результаты показали высокую эффективность применения поляризационного метода, который заключается в повышении детальности расчленения геологического разреза и позволяет однозначно определять анизотропию среды.

Результаты поляризационного анализа поперечных, показали, что азимутальная анизотропия обнаруживается в большом диапазоне глубин, причем азимут поляризации продольной волны остается постоянным, в то время как интенсивность анизотропии поперечных волн существенно варьирует с глубиной. Причиной возникновения анизотропии может служить вертикальная трещиноватость, характеризующаяся наличием выделенного вертикального направления ориентации эллипсов S-волн. Распределение азимутальной анизотропии среды в четырех исследуемых направлениях, характеризуется преобладанием меридионального направления, что хорошо согласуется с результатами распределения коэффициента Пуассона. Это позволяет предположить, что сейсмическая анизотропия в данной зоне вызвана тектоническими напряжениями. В то же время зависимость параметров расщепленных S-волн от направления распространения и пространственной неоднородности физических свойств среды требует более детального анализа данных в пространстве и во времени.

Резкая смена в ориентации эллипсов поляризации поперечных волн, а также их азимутов и углов выхода, свидетельствуют о чувствительности параметров расщепленных волн к изменению напряженно-деформированного состояния среды. Наблюдаются значительные различия в поведении волновых параметров в зависимости от положения станции и глубины. Максимальные изменения характерны для интервала глубин 40–56 км, а также 15–25 км.

Литература

1. Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических исследований. – М.: Недра, 1977. – 279 с.
2. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов Dimas // Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 2004.
3. Етирмишли Г.Д., Казымов И.Э. Выделение вступлений поперечных волн методом поляризационного анализа // Каталог РЦСС НАНА, 2007. – С. 174–181.
4. Етирмишли Г.Д., Казымов И.Э., Казымова С.Э. Зависимость определения положения эпицентра землетрясения от азимутального расположения станций и особенностей времен пробега продольных волн // Сборник материалов Третьей Международной Сейсмологической школы РАН, Москва, 2007.
5. Етирмишли Г.Д., Казымова С. Скоростная модель земной коры Азербайджана по данным цифровых сейсмических станций // Геология и геофизика Юга России. 2012. – № 1. – С. 59–74.
6. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи // Автореферат кандидатской диссертации, Институт Геофизики АН ГССР. – Тбилиси, 1986. – 23 с.
7. Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования // ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН. – Москва, 2000. – 367с.
8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. Возможности поляризационного анализа в решении задач оперативного контроля сейсмической обстановки // Материалы

Международного симпозиума «Устойчивое развитие: Проблемы, Концепции, Модели» посвященного 20-летию КБНЦ РАН, ФГБУН КБНЦ РАН, Том II, 28 июня–3 июля 2013 г. – С. 111–115.

9. Лунева М.Н. Временные вариации параметров расщепленных S-волн от слабых местных землетрясений близкой локализации под восточным Хоккайдо // Физика Земли. – 2008. – № 11. – С. 47–63

10. Лунева М.Н. Сейсмическая анизотропия и частотная зависимость параметров волн от слабых землетрясений в Курильской зоне субдукции // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. № 1. – С. 55–62.

11. Лунева М.Н., Ли Д.М. Анизотропия среды и временные вариации азимута поляризации быстрой S-волны под Южной Камчаткой в период 1993–2002 гг. // Физика Земли. – 2006. – № 4. – С. 40–56.

12. Zaalishvili V.B., Melkov D., Kanukov A.S., Dzeranov B.V. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database // International Journal of GEOMATE. – 2016. Vol. 10. No.1. – Pp. 1656–1661.

DOI: 10.23671/VNC.2016.3.20837

SEISMIC ANISOTROPY PARAMETERS OF TRANSVERSE WAVES BY GAJIGABUL EARTHQUAKE WHICH OCCURRED 10 FEBRUARY 2014 ML = 5,8

© 2016 I.E. Kazimov, Sc. Candidate (Geol.-Min.), S.E. Kazimova, Sc. Candidate (Geol.-Min.)

National Academy of Sciences of Azerbaijan Republican Seismic Survey Center,
Azerbaijan, 1001, Baku, str. Guseyn Javid, 123, e-mail: sabina.k@mail.ru

In the article presents an analysis of the parameters of split shear waves from deep ($h = 56$ km) the earthquake occurred within the Lower Kura depression February 10, 2014 with $M_L = 5.8$. Spatial analysis of waveforms is conducted with use 3-component digital signal records. For selected areas of 3-component records in the program «DIMAS» construct a three-dimensional graph of the trajectory of particle motion and trajectory of the projection on the plane NE, NZ, EZ. Established the birefringence effect, ie, shear wave splits into two (S_1 and S_2), each of which has its polarization and the rate for broadband three component records (BHE, BHN, BHZ) of 4 seismic stations («QUB», «GAN», «LKR», «GOB»). This makes it possible to study small-scale deformations for a better understanding of dynamic processes and properties with depth media.

Keywords: polarization, anisotropy, shear waves, earthquakes.