

СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРЫ ЮГО-ВОСТОКА КАВКАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЕЛОНЕ

О.А. Усольцева, С.Э. Казымова¹, И.Э. Казымов¹

¹ Республиканский Центр сейсмологической службы
Азербайджанской академии наук

В работе анализируются данные времен пробега Р-волн от местных землетрясений, зарегистрированные цифровыми станциями, расположенными в районе восточного окончания складчатой системы Большого Кавказа (46,5–49,9 в.д., 39,5–41,5 с.ш.). Данные от землетрясений собраны за период времени с 2005 по 2010 гг. Для восстановления трехмерной скоростной модели используется алгоритм, разработанный в ИДГ РАН (программа TomotetraFD). В полученной трехмерной скоростной модели характер неоднородностей меняется на глубине ~40 км. В зоне высокой плотности сейсмических событий скоростное поле сильно неоднородно.

Введение

Складчатые системы Большого и Малого Кавказа – это результат сближения Скифской платформенной системы с севера и Аравийской плиты с юга. Процесс складкообразования на Кавказе начался в докембрии (более 542 млн лет назад). В современную эпоху продолжается тектоническое развитие Кавказа. На сегодняшний день Большой Кавказ продолжает подниматься со скоростью 10–13 (местами 15) мм в год. Скорость опускания в Курунском прогибе достигает 4–6 мм в год. Таким образом,

исследование скоростного строения под Кавказским регионом очень важно для более точного определения координат землетрясений, глубины и времени в источнике и для понимания геодинамических процессов под Кавказской горной системой.

Ранее исследование скоростного строения под Кавказом проводилось методом функции приемника в работе [Гасанов, 2001] и с помощью сейсмической томографии по Pn волнам в работе [Randolph et al., 2008]. Изучалось скоростное строение в зоне Спитакского землетрясения (1988 г., Mw = 6,8) и в зоне Рачинского землетрясения (1991 г., Mw = 7,0). Во всех работах показано, что кора под Кавказским горным массивом горизонтально неоднородна. Авторам не известны работы, в которых проводилось детальное исследование скоростей продольных волн под территорией с координатами 46,5–49,9 в.д., 39,5–41,5 с.ш. на глубинах 0–50 км методом сейсмической томографии. С помощью сейсмотомографического алгоритма TomotetraFD [Усольцева, 2004] и сейсмологических данных последних лет, записанных сетью цифровых телеметрических станций Азербайджана, в данной работе предполагается получить новую информацию о скоростных неоднородностях на юго-востоке Кавказского орогена.

Методика исследования

Данное сейсмотомографическое исследование проводилось в три этапа. На первом этапе анализировался исходный набор данных (см. раздел Данные). На втором этапе работы проведен расчет оптимальной одномерной скоростной слоистой модели по программе Velest [Kissling et al., 1994], проверена устойчивость полученной модели. Одновременно с подбором оптимальной одномерной модели проводилось переопределение параметров гипоцентров и времени в источнике в данной одномерной модели и вычисление временных стационарных поправок (см. раздел Одномерная модель скоростей P-волн).

Третий этап работы включал в себя проверку разрешающей способности имеющегося набора данных, построение трехмерной скоростной модели (см. раздел Трехмерная модель скоростей P-волн). Для расчета трехмерного скоростного поля использовалась программа TomotetraFD [Усольцева, 2004]. В этой программе реализован классический сейсмотомографический метод [Aki, Lee; 1976] для случая, когда источники и приемники находятся внутри исследуемого региона. Перевод из географических в декартовую систему координат выполнен так же, как и в программе Sphypit90 [Roedeker, 2001]. В TomotetraFD параметризация модели проводится с помощью тетраэдров Делоне, внутри которых скорость меняется линейно непрерывно. Алгоритм разбиения исследуемого объема на тетраэдры Делоне, используемый в работе, описан в [Barber et al., 1996]. Расчет траекторий сейсмических лучей проводится методом конечных разностей [Podvin, Lecomte, 1991]. Обращение переопределенной разреженной матрицы выполнено как в Simulps [Thurber, 1994]. Весовой коэффициент для каждого луча зависит от эпицентрального расстояния между источником и приемником и величины невязки.

Данные

В качестве исходных данных для исследования была использована выборка из бюллетеня Республиканского Центра сейсмологической службы Азербайджана, содержащего параметры очагов и времена первых вступлений сейсмических фаз

от локальных землетрясений за 2005–2010 гг. Землетрясения регистрировались сетью цифровых телеметрических станций Азербайджана (рис. 1).

Для построения одномерной модели использовались события с максимальным углом между направлениями на две соседние станции (GAP) меньше 180° . Количество регистрирующих события станций больше 5. Данным критериям удовлетворяло 441 событие (рис. 2).

Совместный анализ (рис. 1, 2) показывает, что наибольшая плотность сейсмических станций и землетрясений наблюдается в районе юго-восточного окончания Большого Кавказского хребта и Апшеронского полуострова. Менее плотное расположение сейсмических станций и землетрясений отмечается в районе Кура-Аракинской низменности, на примыкающем к ней побережье и в акватории Каспийского моря.

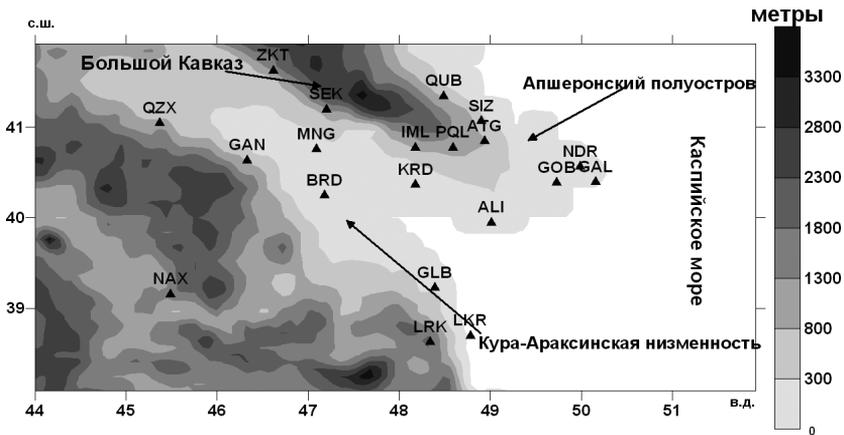


Рис. 1. Сеть цифровых телеметрических станций Азербайджана (20 станций), наложенная на карту рельефа местности, полученную с сайта www.ngdc.noaa.gov.

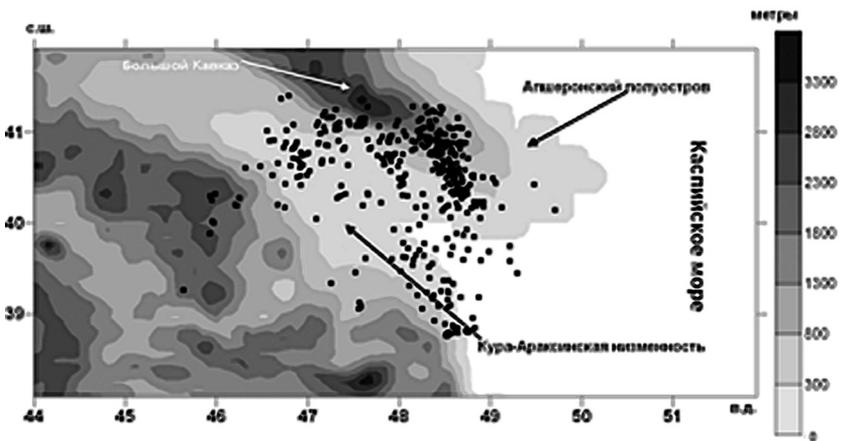


Рис. 2. Карта землетрясений (441 событие), наложенная на карту рельефа местности, полученную с сайта www.ngdc.noaa.gov.

Одномерная модель скоростей Р-волн

В качестве нулевого приближения для одномерной модели использовалась скоростная модель Терско-Каспийского прогиба, полученная по данным ГСЗ [Красноповцева, 1984]. В качестве опорной выбрана станция IML, которая зарегистрировала 80% событий, причем события происходили в различных направлениях вокруг станции (1 квадрант – 68 соб., 2 квадрант – 76 соб., 3 квадрант – 153 соб., 4 квадрант – 69 соб.). Значения временных станционных поправок, рассчитанных по программе *Velest*, представлены в табл. 1. Уточненная слоистая скоростная модель для района исследования 46,5–49,9 в.д., 39,5–41,5 с.ш. представлена в табл. 2.

Таблица 1

Значения временных станционных поправок для сети цифровых телеметрических станций Азербайджана

Назв. ст.	Вр. поп. (сек)						
NDR	1,54	PQL	-0,14	ALI	1,73	ATG	0,49
GAL	1,59	IML	0	GLB	0,26	KDR	0,61
GOB	2,01	SEK	-0,68	LKR	0,03	LRK	-0,63
SIZ	0,71	GAN	-0,6	NAX	0,59	MNG	0,48
QUB	0,87	BRD	0,89	ZKT	0,04	QZX	-0,02

Таблица 2

Полученная слоистая скоростная модель, ошибки определения скорости и количество гипоцентров в каждом слое

Слой, км	Vp, км/с	σV_p , км/с	Кол. гипоц.
Выше 1	1,66	0,15	8
1–8	4,93	0,28	95
8–25	6,01	0,05	226
25–43	7,31	0,03	94
43–52	7,74	0,05	13
Ниже 52	8,02	0,06	5

В нулевом приближении также существовали границы на глубинах 3, 5, 10, 15, 35 км, но постепенно при итеративном поиске минимальной одномерной скоростной модели они исчезли. При данном разбиении на глубины (табл. 2), при расчете по программе *Velest*, наблюдается сходимость к истинному решению, то есть как бы много итераций не проводилось скорость в слоях в пределах ошибки остается неизменной. Проведена проверка устойчивости полученной одномерной модели. Скорости в слоях 8–25 км и 25–43 км были занижены на 5 и на 12% соответственно. Затем после запуска программы *Velest* скорости в слоях восстановились. Аналогичный тест на устойчивость проведен при завышении скоростей сейсмических волн в слоях. Как видно из табл. 2 наибольшее количество землетрясений произошло в слое 8–25 км. Редуцированный годограф для окончательной одномерной ско-

ростной модели представлен на рис. 3. Рассчитаны невязки, как для прямых (40%), так и для преломленных (60%) лучей. Из рис. 3 видно, что разброс невязок составил 3 сек. Эпицентральные расстояния менее 350 км.

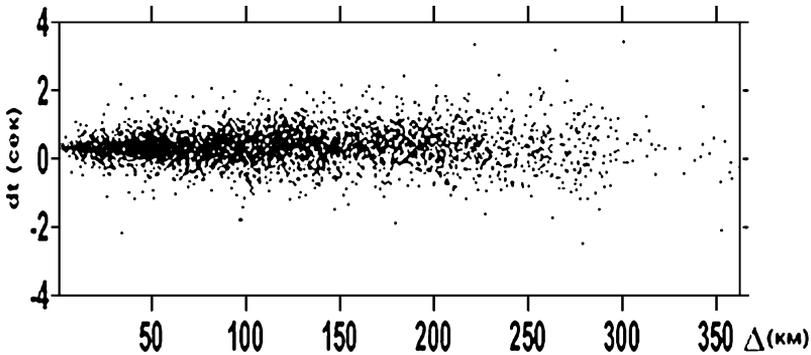


Рис. 3. Редуцированный годограф (4087 лучей), построенный с использованием скоростной модели из табл. 2

Трехмерная модель скоростей Р-волн

Для проверки разрешающей способности имеющихся данных выполнен шахматный тест. Тестовая скоростная функция на всех глубинах имеет вид

$$v(x, y, z) = v_0(z) \left(1 + 0,06 \sin\left(\frac{\pi x}{100}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{100}\right) \right),$$

где $v_0(z)$ скорость в слое из табл. 2 (на разных глубинах – разная). В качестве нулевого приближения использовалась слоистая скоростная модель из табл. 2. Как видно из вышеприведенной формулы отклонения значения скоростей от нулевого приближения на всех глубинах одинаковы. Горизонтальное сечение тестовой скоростной модели для любой глубины представлено на рис. 4 (вверху). В тестовой скоростной модели рассчитаны времена пробега для всех лучей. Результат восстановления скоростного поля после первой итерации по программе TomotetraFD представлен на рис. 4 (внизу). Из рис. 4 видно, что клетчатые неоднородности восстанавливаются наилучшим образом в районе 46,5–49,9 в.д., 39,5–41,5 с.ш. На глубинах 4,5 и 47,5 км они менее отчетливые, а на глубинах 16,5 и 34 км более отчетливые. Таким образом, на глубинах 16,5 и 34 км удается достичь наилучшего восстановления трехмерной скоростной структуры.

При расчете тестовой скоростной модели, также как и при расчете реальной скоростной модели, точки сетки по оси x устанавливались через каждые 50 км, а по оси y через 30 км. В обращении участвовало 396 параметров модели, решаемая система линейных уравнений переопределена ~ 10 раз. Восстановленная по имеющемуся набору данных скоростная модель представлена на рис. 5. Полученная трехмерная модель является линейной квазинепрерывной (функция скорости претерпевает разрыв на конкретных глубинах), а в горизонтальном направлении – непрерывна.

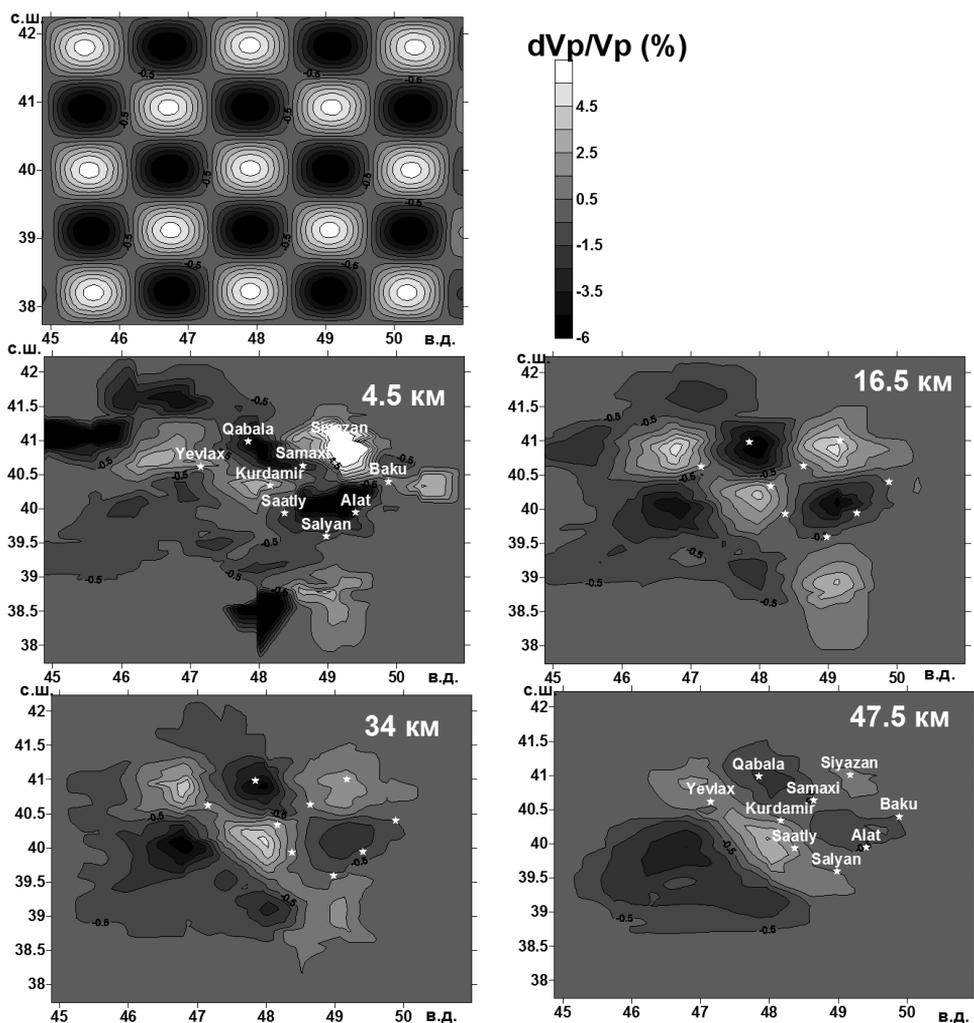


Рис. 4. Проверка разрешающей способности имеющихся данных с помощью шахматного теста. Горизонтальные сечения тестовой (вверху) и восстановленной (внизу) моделей на различных глубинах. Представлены отклонения значения скоростей от нулевого приближения в процентах.

Обсуждение результатов

На сечениях 4,5 и 16,5, 34 км (рис. 5) можно выделить 3 скоростные зоны: две высокоскоростные и одна низкоскоростная, которые видоизменяются с глубиной. Высокоскоростные области окаймляют низкоскоростную с севера и с юга. Северная высокоскоростная область расположена в районе городов Евлах, Габала. Низкоскоростная неоднородность оконтурена городами Курдамир, Саатлы, Баку, Алят, Шамахи. На сечении 34 км низкоскоростная область выделяется в районе города Шамахи и на юго-западе исследуемой области. На сечении 16,5 км видно, что основное количество землетрясений сосредоточено в районе города Шамахи у восточного окончания высокоскоростной зоны. На сечении 47,5 км характер неоднород-

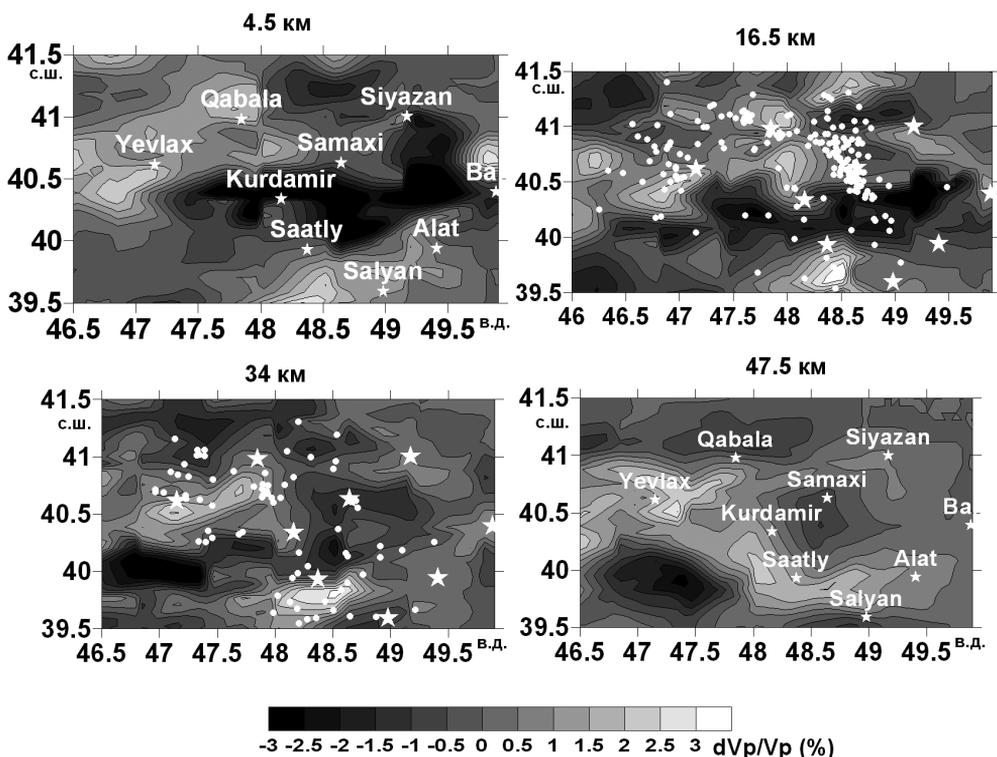


Рис. 5. Горизонтальные сечения трехмерной модели скоростей Р-волн на различных глубинах. Представлены отклонения значения скоростей от нулевого приближения в процентах. На срезе 16,5 км белыми точками обозначены события с глубиной от 8 до 25 км, на срезе 34 км - с глубиной от 25 до 43 км. Белыми звездами обозначены города

ностей отличается от более мелких глубин. На этой глубине наблюдается высокоскоростная неоднородность в направлении СЗ-ЮВ, захватывающая города Евлах, Курдамир, Саатлы.

На участке между параллелями 47,7 и 49,0 в.д., ограниченном северными широтами 40,7 и 41,3 [Хаин, Богданов; 2003], выявлено большое количество коротких разломов субмеридионального и субширотного направлений. В характере скоростного поля продольных волн также проявляется усложненность исследуемого региона различными структурными элементами.

Заклучение

Как видно из рис. 4 использование сейсмотомографического алгоритма TomotetraFD [Усольцева, 2004] в совокупности с имеющимися сейсмологическими данными последних лет позволяет восстановить скоростные неоднородности размером 100×100 км в коре в районе 46,5–49,9 в.д. и 39,5–41,5 с.ш.

В исследуемом районе согласно международной тектонической карте Каспийского моря и его обрамления [Хаин, Богданов; 2003] выделяются 3 тектонические структуры – это Куринская впадина, с севера граничащая со складчатой систе-

мой Большого Кавказа, а с юга со складчатой системой Малого Кавказа. В работе (рис. 5) на глубинах 4,5 и 16,5, 34 км также выделены три скоростные зоны: две высокоскоростные и одна низкоскоростная. Согласно тектонической карте Куринская впадина и складчатая система Большого Кавказа имеют ориентацию СЗ-ЮВ. В данном исследовании низкоскоростная область на глубинах 4,5 и 16,5, 34 км субшироотно направлена и только высокоскоростная зона на глубине 47,5 км имеет направление СЗ-ЮВ.

Для более детального анализа горизонтальных скоростных неоднородностей необходимо построение трехмерной модели скоростей поперечных волн, вычисление анизотропных скоростных моделей, расчет трехмерной модели параметра добротности в районе.

Литература

Aki K., Lee W.H.K. Determination of three-dimensional velocity under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes. A homogeneous initial model // JGR, V. 81, N. 23, P. 4381-4399, August 10, 1976.

Barber C.B., D.P. Dobkin, H.T. Huhdanpaa. The Quickhull Algorithm for Convex Hulls, ACM Trans. on Mathematical Software, Dec. 1996. <http://www.acm.org/pubs/citations/journals/toms/1996-22-4/p469-barber/http://www.geom.umn.edu/software/qhull/qhull-96.ps>

Kissling E., W.L. Ellsworth, D. Eberhart-Phillips, U. Kradolfer. Initial reference models in local earthquake tomography// JGR. 1994. V. 99, N. B10, P. 19, 635-19, 646, Oct. 10.

Podvin P., and I. Lecomte, Finite difference computation of travel times in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools, Geophys. J. Int. 105, 271–284, 1991

Randolph M., M. Krasovec, S. Romer, T. O'Connor, E.G. Bombolakis, Y. Sun, N. Toksoz Caucasus Seismic Information Network: Data and Analysis, Final Report, 2008, http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?query_id=0&page=0&osti_id=899760 Roecker S. SPHYPIT90 MANUAL, <http://gretchen.geo.rpi.edu/roecker/manuals/sphypit90/Sphypit90.html>, 2001

Thurber C.H., D. Eberhart-Phillips, R. Evans. User's manual for simulps12 for imaging V_p and V_p/V_s : a derivative of the «thurber» tomographic inversion SIMUL3 for local earthquakes and explosions // Department of the Interior U.S. Geological Survey, 1994.

Гасанов А.Г. Глубинное строение и сейсмичность Азербайджана в связи с прогнозом нефтегазоносности. Элм. Баку, 2001, с. 166–187.

Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука, 1991, 109 с.

Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления / под ред. В.Е. Хаина и Н.А. Богданова: масштаб 1:2500000. Объяснительная записка. М.: Научный мир, 2003. 118 с.

Усольцева О.А. Трехмерные скоростные модели земной коры Тянь-Шаня на основе би-сплайн параметризации и триангуляции Делоне / Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ИДГ РАН, Москва, 2004.