

УДК 550.34

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАВКАЗА

Бурмин В.Ю.¹, Шемелева И.Б.¹, Флейфель Л.Д.¹ Аветисян А.М.², Казарян К.С.²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Институт геофизики и инженерной сейсмологии НАН Армении, г. Гюмри, Армения

Введение

Кавказ представляет собой тектонически-активную и сейсмоопасную зону. Геодинамическая активность здесь выражается в современных медленных движениях, поверхности, разломах и блоках коры, а также в быстрых сейсмогенных подвижках по разломам и в узлах их пересечения. На Кавказе происходили землетрясения с магнитудами до 7.0 относящиеся к разряду катастрофических землетрясений.

Хорошо известно, что для успешного прогноза сильных землетрясений, сейсмического районирования и сейсмостойкого строительства необходимо, прежде всего, иметь достаточно четкое представление о распределениях гипоцентров землетрясений на изучаемой территории.

Для того чтобы определять положение очагов землетрясений с высокой точностью необходимо иметь достаточно детальное представление о глубинном строении земной коры и верхней мантии в изучаемом регионе. При этом, желательно брать сведения о строении региона не по данным о землетрясениях, а по данным других наблюдений, например, по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Так до недавнего времени использовался годограф А.Я. Левицкой [12] или годограф Джеффриса-Буллена с внесением станционных поправок, которые должны учитывать условия под станциями [15].

Методы исследования

По сути, все известные методы определения координат гипоцентров сводятся к минимизации функционала невязок теоретических и наблюдаемых времен пробега сейсмических волн, который впервые был предложен в работах [19, 20]. Однако, как показано в работе [3] такой подход к определению координат гипоцентров не является оптимальным.

Пусть R_i , D_i и H соответствуют теоретическим временам t_i пробега сейсмических волн от очага до i -й станции, где $R_i = v_i t_i$ – гипоцентральные расстояния; $D_i = \sqrt{R_i^2 - H^2}$ – эпицентральные расстояния и H – глубина очага землетрясения; $r_i = u_i t_i$, d_i и h – те же величины, но соответствующие истинному положению гипоцентра ($u_i = v_i - d v_i$).

Координаты гипоцентра и сейсмических станций связаны известным соотношением

$$(X-x_i)^2 + (Y-y_i)^2 + H^2 = v_i^2 (t_i - t_0)^2 = d_i^2 + h^2. \quad (1)$$

Задачу определения координат гипоцентров землетрясений следует ставить не как задачу минимизации функционала S_i или, что эквивалентно, не как суммы разности длин векторов $\mathbf{R}_i$ и $\mathbf{r}_i$, а как задачу минимизации функционала

$$S = \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - d_i)^2 + Y (H - h)^2,$$

где D_i и H определяются из решения системы нелинейных уравнений (1).

Величины h задаются на одномерной сетке $\square$, в интервале $[0, h_M]$, а h_M вычисляется из условия

$\tau_{\min} = \int_0^{h_M} \frac{dz}{v(z)}$, где $\tau_{\min}$ – время пробега сейсмической волны до ближайшей от очага сейсмической станции.

Для каждого h определяются величины d_i путём решения прямой кинематической задачи сейсмоки из условия близости теоретических времен t_i пробега сейсмических волн (определённых, например, по графику Вадати) наблюдаемым временам $\tilde{t}_i$.

Из решения прямой кинематической задачи сейсмоки определяются лучевые параметры, а затем, по найденным их значениям вычисляются эпицентральные расстояния d_i .

При этом под каждой станцией задается своя скоростная колонка, что позволяет учитывать различное строение, прежде всего, строение земной коры под каждой точкой наблюдений. Таким образом, решается квази-трехмерная задача.

В функционал S время в очаге t_0 не входит явно, но входит в систему нелинейных уравнений. Поэтому минимизация функционал S проводится для заданного t_0 , которое определяется по графику Вадати. Понятно, что время в очаге определяется по графику Вадати с некоторой ошибкой, которая может быть больше или меньше, в зависимости от точности снятия времен прихода продольных и поперечных волн. Поэтому для тех событий координаты, которых определяются с большими ошибками (больше некоторой заданной величины), варьируются значения t_0 , таким образом, чтобы функционал S принял минимальное значение.

Такова, в общих чертах, идеология определения координат землетрясений на основе которой были переопределены гипоцентры землетрясений Кавказа.

Исходные данные

Для определения координат гипоцентров землетрясений Кавказа были использованы данные бюллетеней сейсмических станций Кавказа и данные из фондов ГС РАН [6, 16, 17, 18, 13].

Для каждой сейсмической станции были заданы свои скоростные колонки. Основные сведения о глубинном строении земной коры под сейсмическими станциями были получены из данных по профилям ГСЗ [1, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 14].

Распределение гипоцентров территории Кавказа

На рис. 1 и 2 показаны результаты определения гипоцентров землетрясений Кавказа за период 1971-2015 гг., для которых погрешности в определении глубины очага не превышает 5 км. Всего на рисунках показаны около 10150 событий из 14400, которые зарегистрированы 3-мя и более станциями, и данные о которых представлены в кавказских бюллетенях.

На рис. 1 приведено распределение эпицентров землетрясений Кавказа. Из рассмотрения этого рисунка можно видеть, что эпицентры землетрясений в основном локализуются в отдельных областях, которые не связаны между собой.

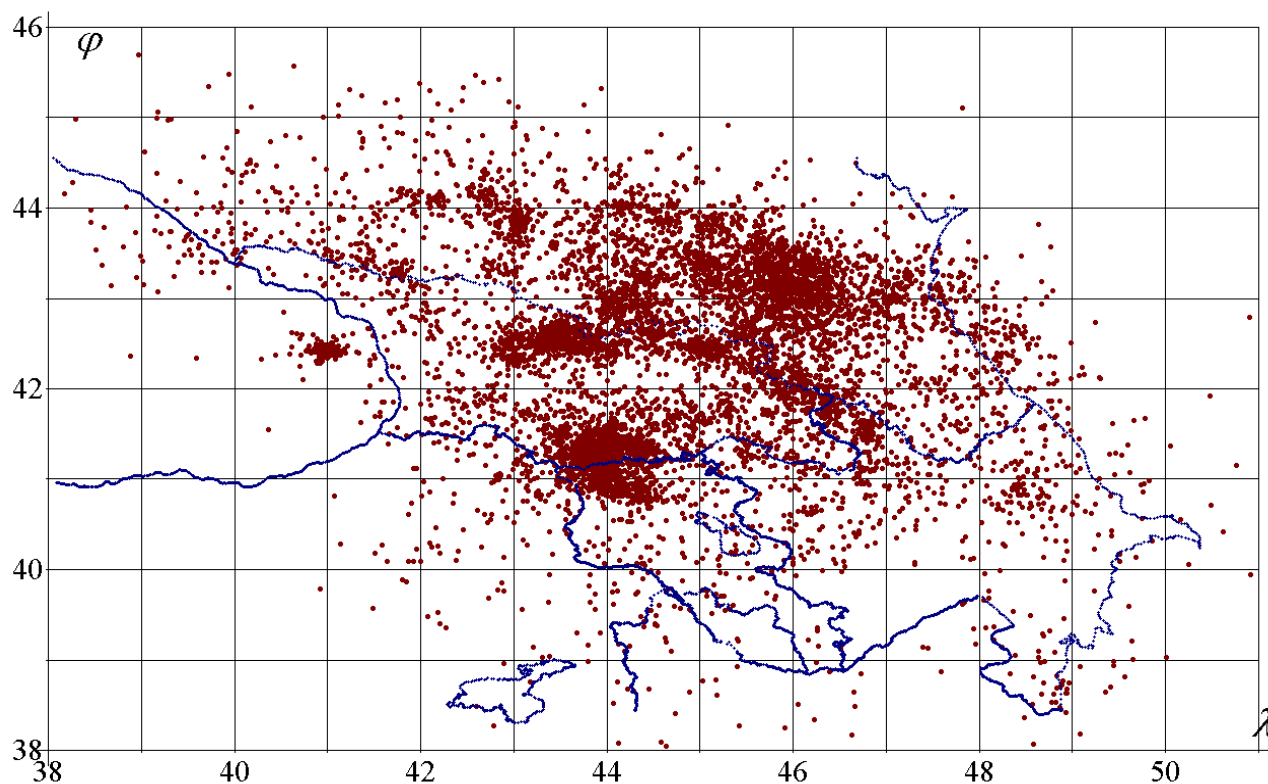


Рис. 1. Распределение эпицентров землетрясений Кавказа за период 1971 – 2015 гг.

Условно можно выделить четыре основные эпицентральных области. Первая область приурочена к Джавахетскому нагорью и имеет подковообразную форму, в которую упирается западная оконечность Малого Кавказа. Вторая область тяготеет к Рачинскому району. Третья область

расположена на территории Чеченской республики с центром в непосредственной близости от г. Грозный. И, наконец, четвертая область представляет собой цепь очаговых зон, вытянутых вдоль южного склона Большого Кавказа.

На рис. 2 показаны гипоцентры кавказских землетрясений в долготной и широтной плоскости в диапазоне глубин 0 – 50 км и 0 – 500 км. Как следует из рисунка 2а и 2в, очаги коровых землетрясений, приуроченные к различным эпицентральной зонам, оказываются сосредоточенными в узких областях вытянутых практически в строго вертикальном направлении.

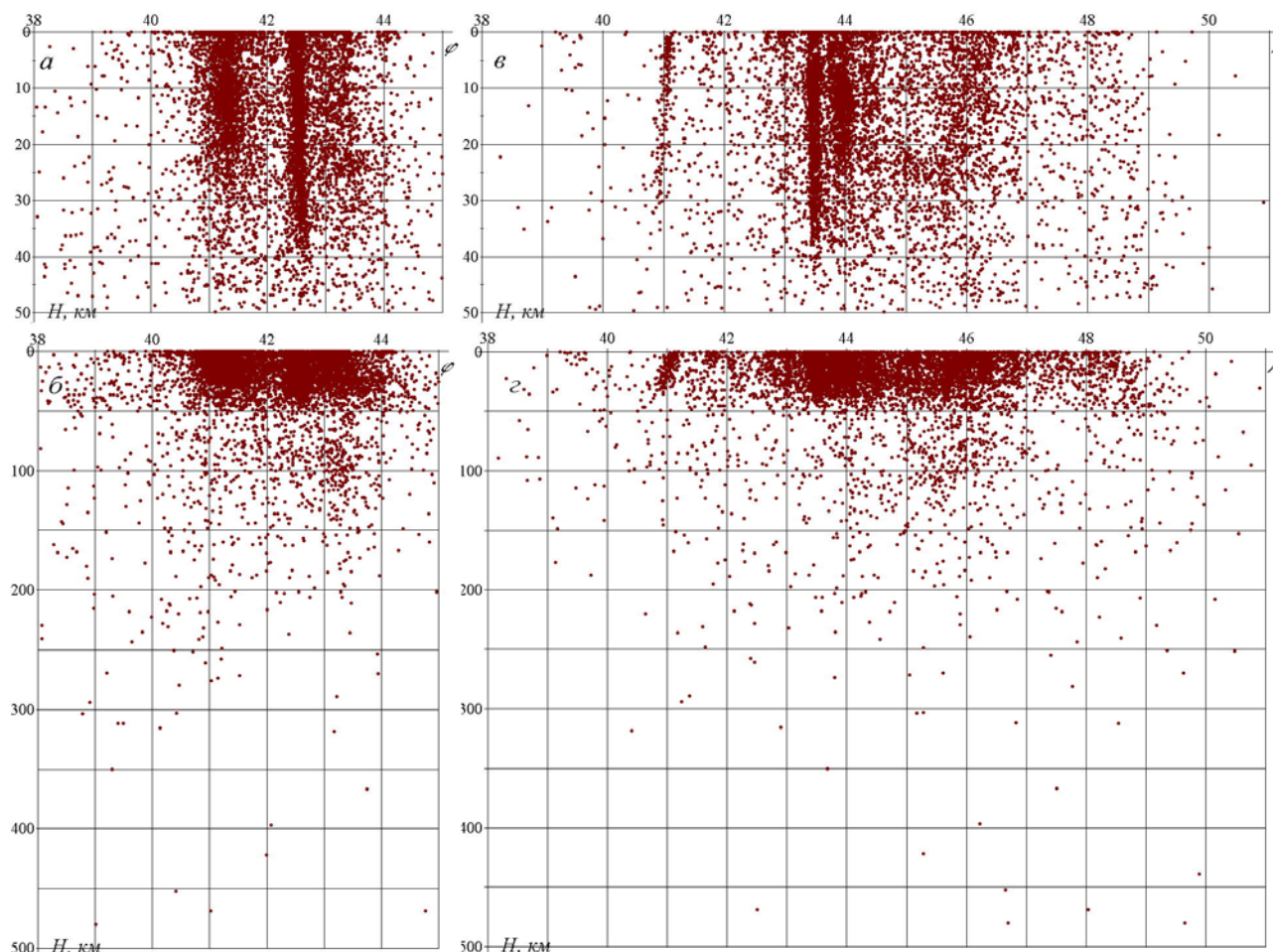


Рис. 2. Распределение гипоцентров землетрясений Кавказа в долготной (а) и (б) и широтной (в) и (г) плоскостях за период 1971 – 2015 гг.

На рис. 3 показаны теоретические годографы и экспериментальные точки для трех наиболее глубоких землетрясений и для глубины источника 5 км. Из рисунка видно, что экспериментальные точки для этих землетрясений хорошо ложатся на теоретические годографы, а годограф первых вступлений от источника 5 км лежит значительно ниже экспериментальных точек. При этом все точки лежат на участке годографов до точки перегиба, что говорит об устойчивом определении глубины гипоцентра. Заметим, что точность определения глубины этих трех землетрясений не превышает 1.5 км.

Важной особенностью распределения землетрясений на Кавказе является то, что кроме коровых землетрясений имеют место и достаточно глубокие мантийные землетрясения. Этот факт, помимо непосредственных определений, подтверждается построением теоретических годографов по данным, опубликованным в каталогах и бюллетенях Кавказа. Наличие очагов глубоких землетрясений на Кавказе существенно меняет наши взгляды на строение и геотектонику региона. Очевидно, что землетрясения в земной коре являются доминирующими в сейсмичности региона (около 90%), но очевидно также, что мантийные землетрясения вносят в неё существенный вклад. То, что их доля в общем количестве землетрясений гораздо меньше, чем доля коровых землетрясений, может говорить о том, что кора более жесткая и хрупкая, чем верхняя мантия.

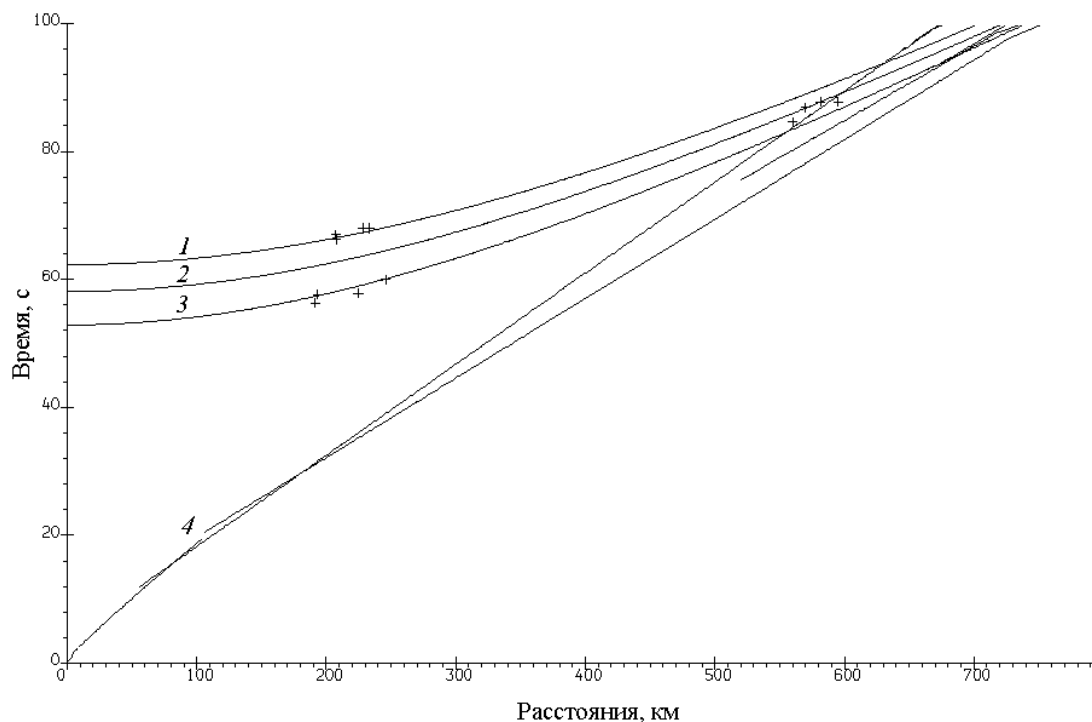


Рис. 3. Теоретические годографы и экспериментальные точки после пересчета для трех землетрясений, представленных на рис. 8 – 10: 1 – глубина источника 527.37 км; 2 – глубина источника 486.12 км; 3 – глубина источника 436.6 км; 4 – глубина источника 5.0 км.

Выводы

На основе сейсмологических бюллетеней Кавказа за 1970 – 2015 гг. произведено переопределение координат гипоцентров землетрясений Кавказа. Общая картина распределения гипоцентров землетрясений в земной коре Кавказа существенно отличается от распределения гипоцентров по каталогу. Полученные ранее результаты, со всей очевидностью говорят о том, что используемые в практике сейсмической службы методы определения гипоцентров землетрясений не позволяют достаточно точно лоцировать события и вряд ли могут являться основной, для прогноза землетрясений и детального изучению строения земной коры и верхней мантии. Кроме этого, времена прихода сейсмических волн зачастую имеют большие ошибки, которые не позволяют проводить качественную обработку наблюдений и, следовательно, получить достоверные результаты. Помимо этого, привлечение одной скоростной колонии или одного набора годографов для определения гипоцентров землетрясений для всех станций сети также не способствует точному определению положения гипоцентров землетрясений. Более того, ограничиваясь скоростным распределением или годографами до небольших глубин, из рассмотрения сразу исключаются очаги с большими глубинами.

Очевидно, что для более надежной локации землетрясений на Кавказе целесообразно использовать данные, полученные методами ГСЗ и КМПВ, и при этом для каждой станции следует задавать свою колонку, как для земной коры региона, так и для больших глубин, захватывающих верхнюю мантию Земли. Известно, что упомянутые выше методы изучения строения Земли позволяют получать скоростные разрезы в пределах земной коры и в редких случаях на сверх длинных профилях для верхней мантии. Поэтому вопрос скоростного строения верхней мантии для отдельных регионов, как правило, остаётся открытым. В этом случае приходится использовать данные средние по Земле или уточнять скоростной разрез верхней мантии региона по совокупности землетрясений (см., например, [5]). Кроме этого, следует использовать более устойчивый метод при решении данной задачи [3].

Хочется отметить одну особенность исходных данных, которая характерна не только для Кавказа, но и для других сейсмических регионов. Как правило, число событий в каталогах значительно превосходит число событий, для которых публикуются бюллетени, содержащие времена прихода сейсмических волн на станции. Спрашивается, как были определены параметры гипоцентров

землетрясений приведенные в каталогах, если для большинства событий отсутствуют исходные данные? Почему опубликована только часть исходных данных, и можно ли в этом случае доверять каталогам?

Статья подготовлена по госзаданию ИФЗ РАН.

Список литературы

1. Андреев В.К., Трофименко Е.А., Шемпелев А.Г., Фельдман И.С.. Изучение глубинного строения Большого Кавказа геофизическими методами. // Недра Поволжья и Прикаспия. Региональный научно-технический журнал. Триннадцатый специальный выпуск. Саратов, Нижне-волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики. 1995. С. 18–24.
2. Балавадзе Б.К., Тбалтвадзе Г.К.. Строение Земной коры в Грузии по геофизическим данным. // Известия Академии наук СССР. Серия геофизическая. № 9. 1968. С. 1075–1083.
3. Бурмин В.Ю. Новый подход к определению параметров гипоцентров близких землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 73–82.
4. Бурмин В.Ю., Аветисян А.М., Геворкян К.В.. Анализ исходных данных региональной сейсмологической сети Кавказа и построение по ним осредненной скоростной кривой // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 68–78.
5. Бурмин В.Ю., Саврина Л.А., Кузнецов Ю.А. Скоростной разрез верхней мантии охотоморского региона по данным глубокофокусных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 64–75.
6. Бюллетень сети сейсмических станций Кавказа. Тбилиси. «Мецниереба». 1973, 1974 гг.
7. Гаретовская И.В., Краснопецева Г.В., Сизов А.В., Файтельсон А.Ш., Щукин Ю.К. Изучение глубинного строения Северо-Кавказской сейсмоопасной зоны с помощью сейсмических и гравиметрических методов. – Основные проблемы сейсмостектоники. М.: Наука. 1986. С. 105–118.
8. Греков И.И., Литовко Г.Б. Геолого-геофизическая модель Северо-Кавказской складчатой зоны и Скифской эпигерцинской плиты по профилю Ахмелв - Южное - Сухокумское. // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы. Материалы XXXVI Тектонического совещания. М. ГЕОС. 2003. С. 161–167.
9. Давыдова Н.И., Краснопецева Г.В., Манилов С.А., Леви В.А., Лобастова Л.А., Шекинский Э.М., Твалтвадзе Г.К. Результаты глубинного сейсмического зондирования земной коры на Кавказе. В сб. Глубинное строение Кавказа. М.: Наука. 1966. С. 43–56.
10. Краснопецева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука, 1984. 108 с.
11. Краснопецева Г.В., Кузин А.М.. О тектонике и геодинамике Кавказского региона по данным переинтерпретации профиля ГСЗ "Волгоград - Нахичевань" // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя. Материалы тектонического XLIII совещания. Том I. М. ГЕОС, 2010. С. 386–390.
12. Левицкая А.Я., Лебедева Т.М. Годограф сейсмических волн Кавказа. Квартальный сейсмический бюллетень. XXI. N 1-4. Тбилиси. 1953. С. 51–59.
13. Международный сейсмологический центр. <http://www.isc.ac.uk/>. 1979-2014.
14. Павленкова Г.А.. Строение Земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное - Бакуриани и Волгоград - Нахичевань. (Результаты переинтерпретации первичных данных) // Физика Земли. №5. 2012. С. 16–25.
15. Саакян А.А. Эпицентральные поправки к стандартному годографу Джеффриса-Буллена для Армянского нагорья // Изв.АН Арм.ССР. Науки о Земле. 1981. № 5. С. 75–81.
16. Сейсмический бюллетень Кавказа. Тбилиси. «Мецниереба». 1973-1990 гг.
17. Сейсмологический бюллетень Северного Кавказа. Фонды ГС РАН. Обнинск. 1991-2015.
18. Сейсмологический бюллетень Армении. Фонды Национальной службы сейсмической защиты Республики Армении. 1987-2015.
19. Geiger L. Herbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten // K. Gessell. Wiss. Goett. 1910. V. 4. P. 331–349
20. Geiger L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only // Bull. St. Louis Univ. 1912. V. 8. P. 60–71.