



Пространственное распределение землетрясений Кавказа

**В.Ю. Бурмин¹⁾, И.Б. Шемелева¹⁾,
А.М. Аветисян²⁾, К.С. Казарян²⁾**

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

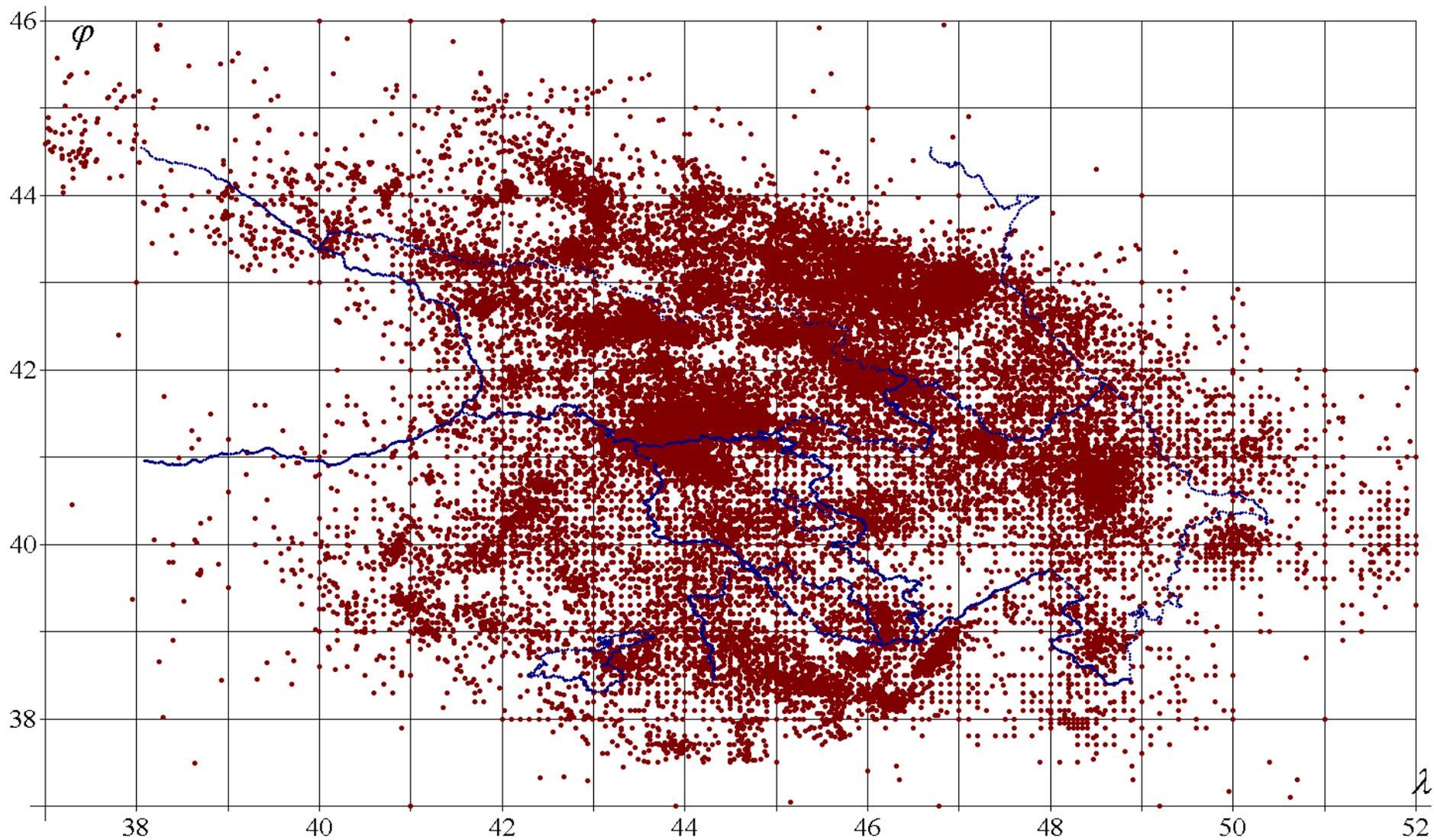
*2) Институт геофизики и инженерной сейсмологии НАН
Армении, г. Гюмри, Армения*

1. Введение
2. Метод решения задачи
3. Пространственное распределение коровых землетрясений Кавказа
4. Мантийные землетрясения Кавказа

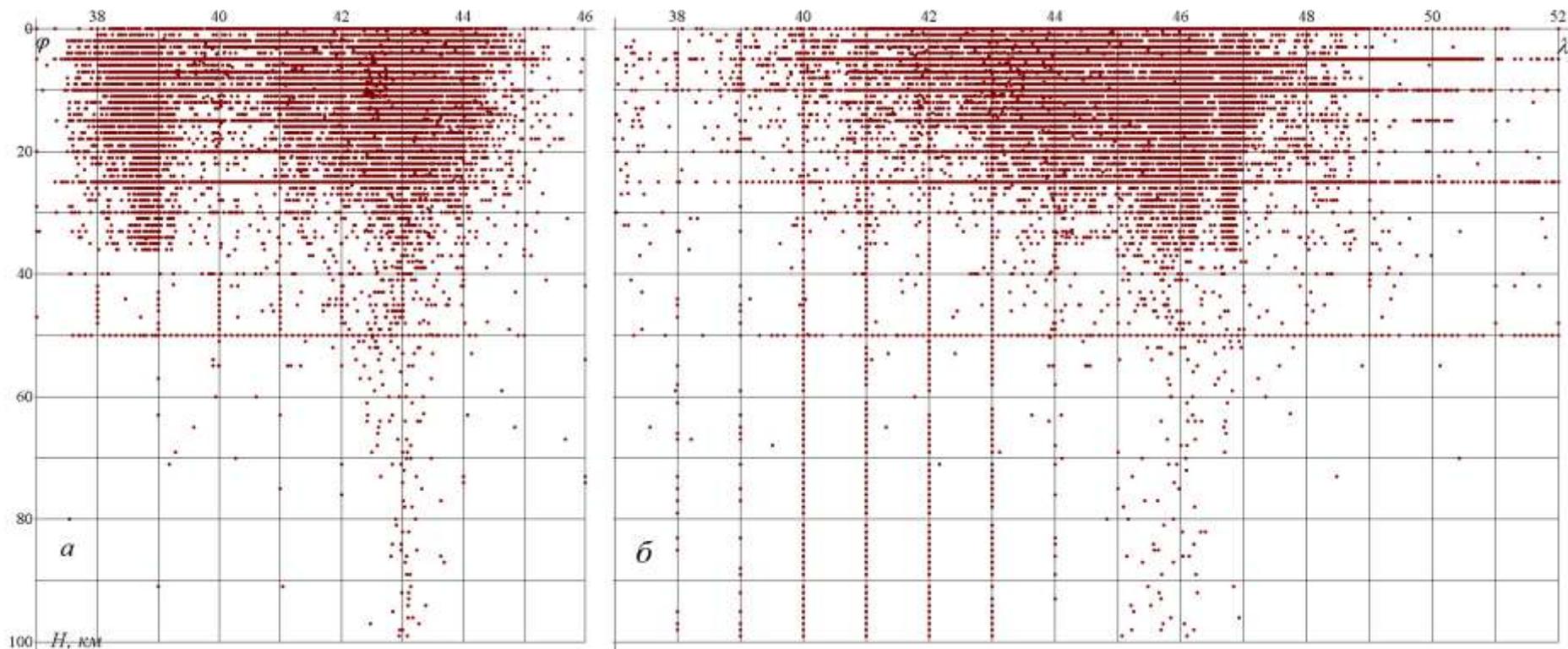
Введение

Хорошо известно, что для понимания геодинамических процессов того или иного сейсмоактивного региона, успешного прогноза сильных землетрясений, сейсмического районирования и сейсмостойкого строительства, необходимо, прежде всего, иметь достаточно четкое представление о распределениях гипоцентров землетрясений на изучаемой территории. На Кавказе происходили землетрясения с магнитудами до 7.0 относящиеся к разряду катастрофических землетрясений.

До недавнего времени для определения координат гипоцентров кавказских землетрясений использовался годограф А.Я. Левицкой [*Левицкая А.Я., Лебедева, 1953*] или годограф Джеффриса-Буллена с внесением стационарных поправок, которые должны учитывать условия под станциями [*Саакян, 1981*].



Распределение эпицентров землетрясений Кавказа за период
1962-2011 гг. (по каталогу).



Распределение гипоцентров землетрясений Кавказа в долготной (*а*) и широтной (*б*) плоскостях за период 1962-2011 гг. (по каталогу).

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В сейсмологической практике за координаты гипоцентров землетрясений принимается точка в пространстве, которая минимизирует функционал невязки времен

$$S_t = \sum_{i=1}^n (t_i - \tilde{t}_i)^2$$

где t_i – теоретические времена пробега сейсмических волн; \tilde{t}_i – наблюдаемые времена пробега сейсмических волн.

Однако легко показать, что такой подход не является оптимальным и на практике может приводить к значительным погрешностям, особенно в определении глубины гипоцентра.

В связи с этим, был предложен метод отличный от традиционного метода, который обладает большей устойчивостью в определении координат гипоцентров.

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; $D_i =$ – 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 ($u_i = v_i - dv_i$).

Координаты гипоцентра и сейсмических станций связаны известным соотношением

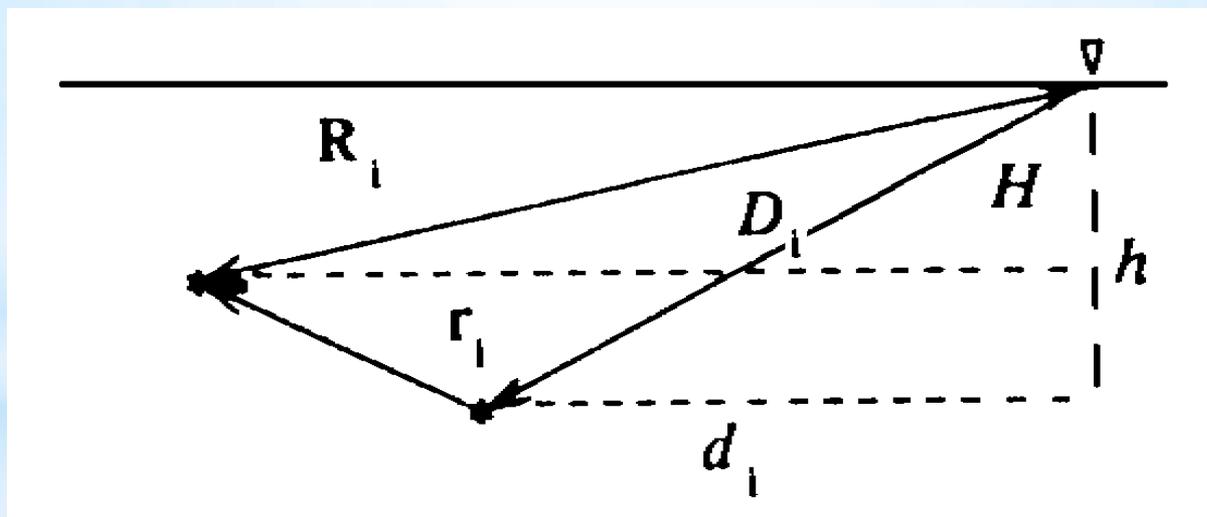
$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + H^2 = v_i^2 (t_i - t_0)^2 = d_i^2 + h^2$$

Для функционала S_t справедлива оценка

$$S_t = \sum_{i=1}^n (t_i - \tilde{t}_i)^2 \leq \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - d_i)^2 + Y(H - h)^2 = S$$

Из этого соотношения следует, что малость значения функционала S_t не гарантирует малости значений функционалов невязок в определении глубины гипоцентра землетрясения и эпицентральных расстояний, но малость значения функционала S влечет за собой малость значения функционала невязки времен.

Это утверждение - следствие того факта, что квадрат разности $(R_i - r_i)^2$ суть квадрат разностей модулей векторов R_i и r_i и не зависит от их направлений, в то время как сумма квадратов разностей $(D_i - d_i)^2 + (H - h)^2$ есть квадрат модуля разности $R_i - r_i$ соответствующих векторов. Последнее утверждение поясняет рисунок



Задача определения гипоцентров землетрясений ставится как задача минимизации функционала

$$S = \sum_{i=1}^n [(D_i - d_i)^2 + (H - h)^2].$$

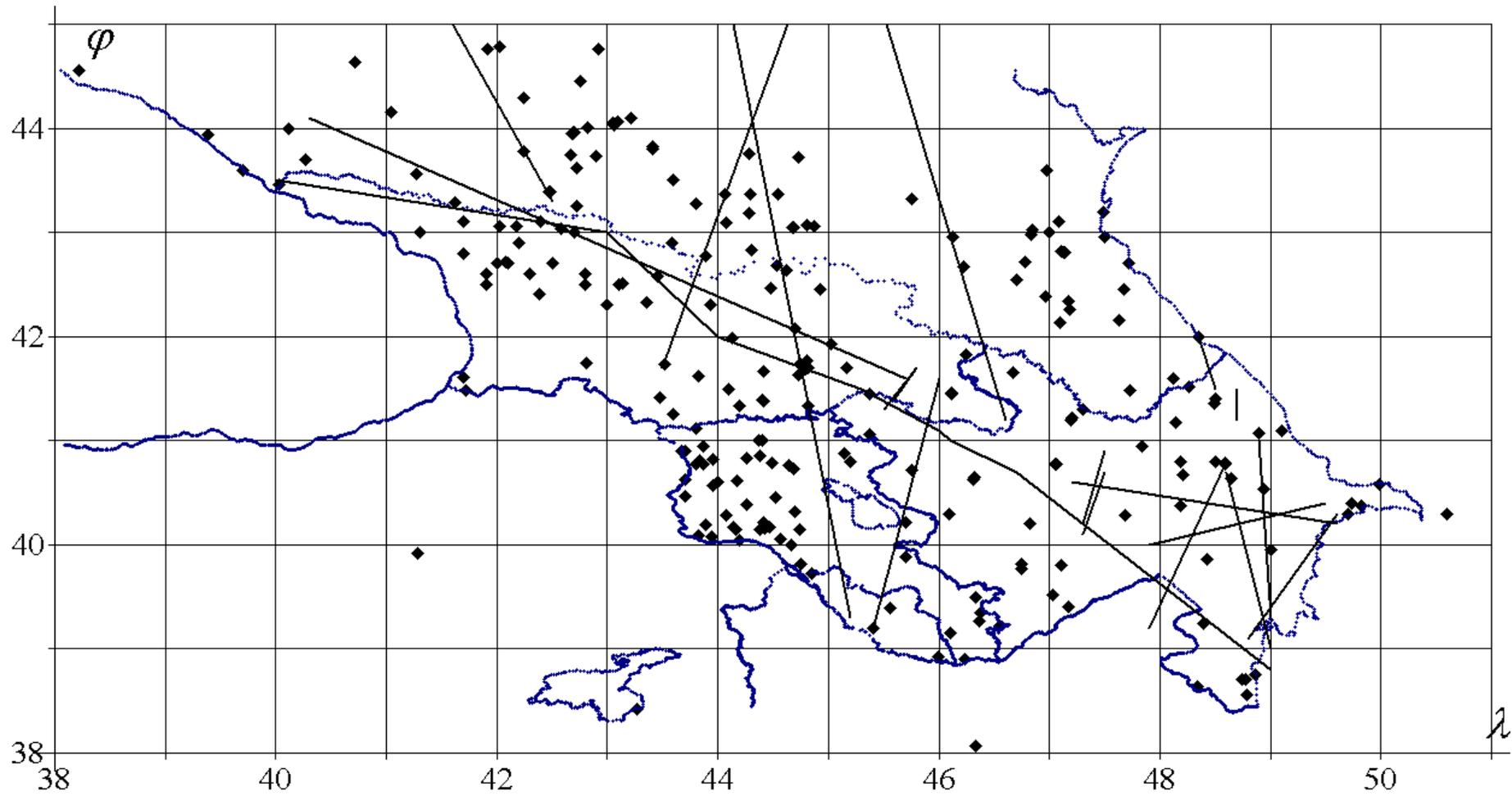
Где D_i и H определяются из решения системы нелинейных уравнений,

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

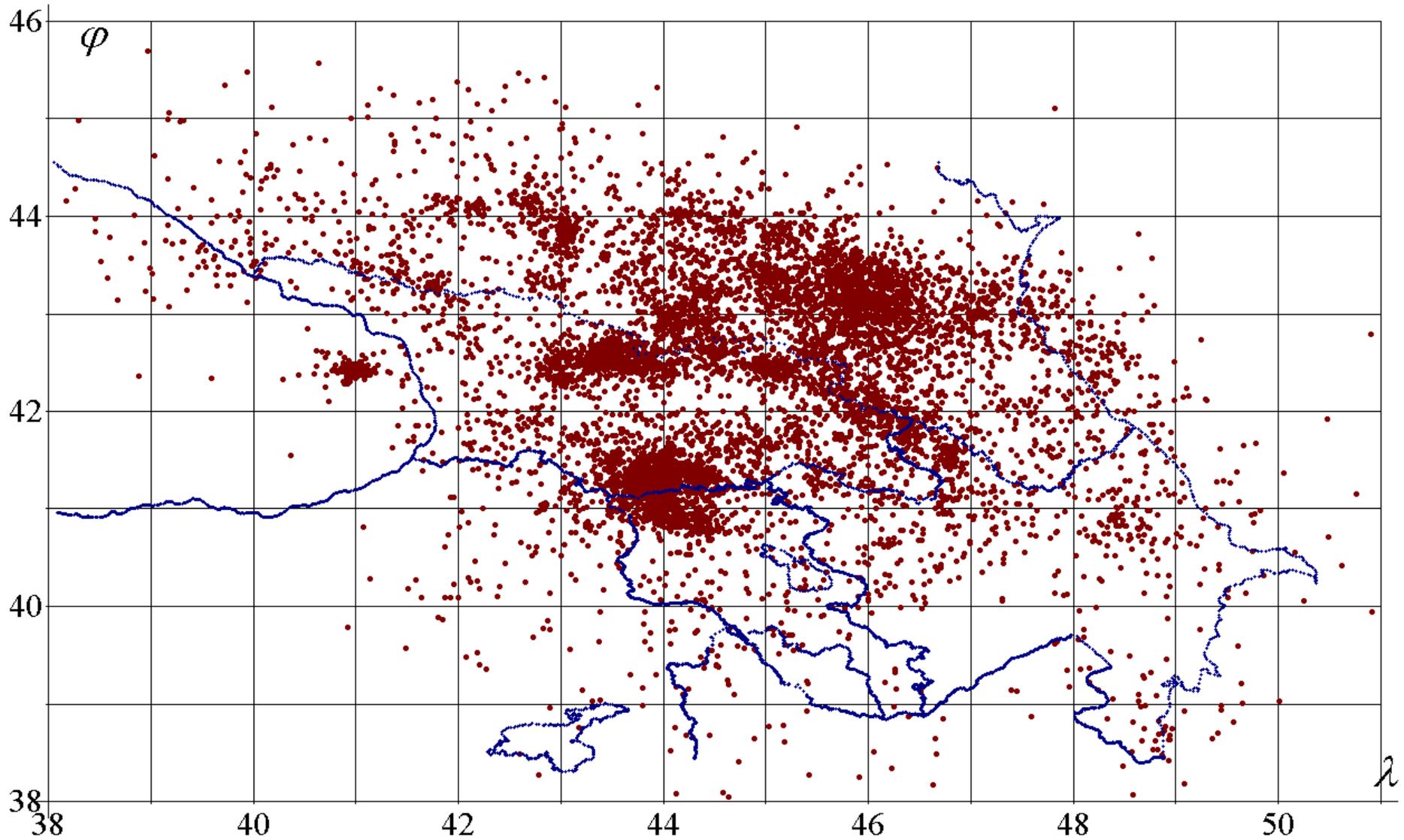
а d_i определяются по временам пробега сейсмических волн. $h \in \Xi$. Ξ множество возможных глубин гипоцентров землетрясений. Оптимальное значение h_0 ищется простым перебором на множестве Ξ

**Пространственное
распределение коровых
землетрясений Кавказа**

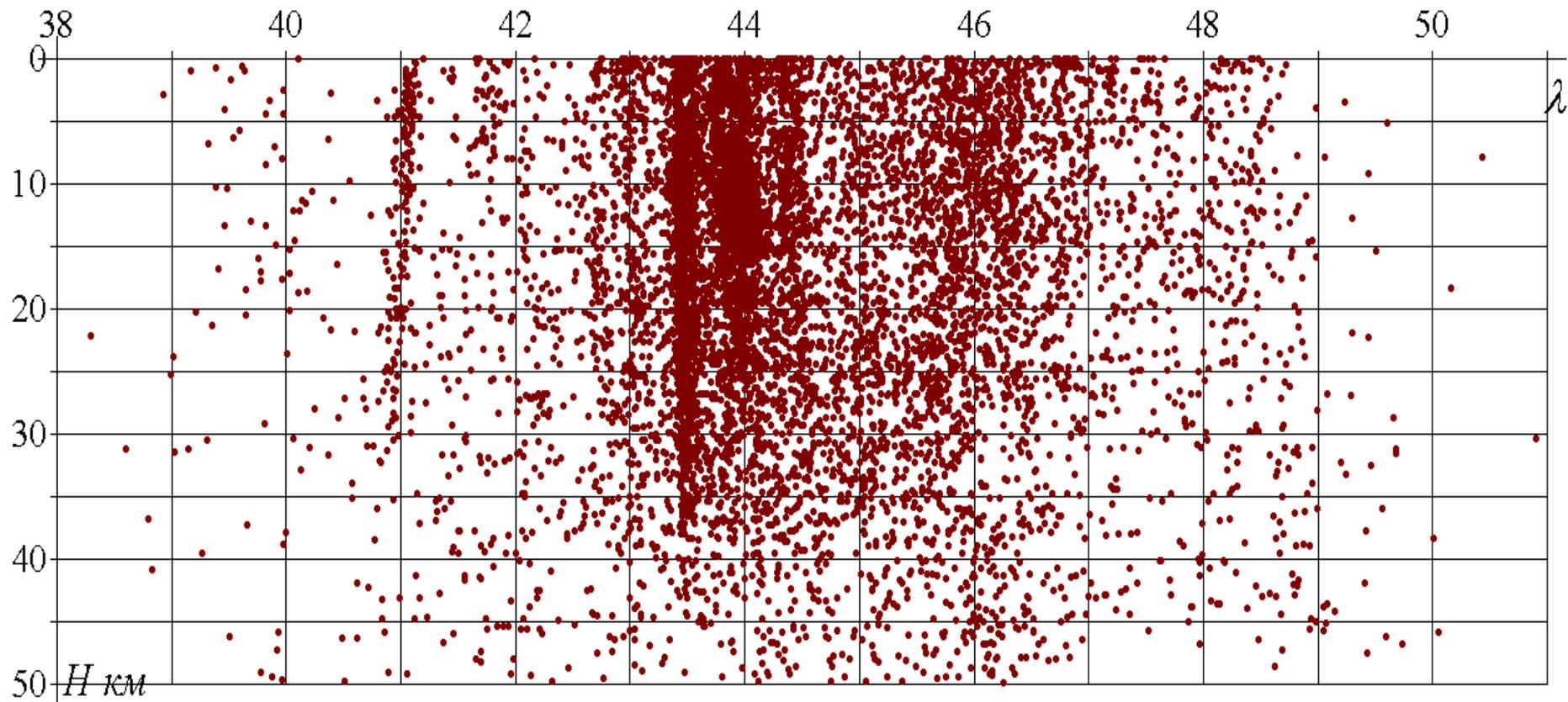
Для того чтобы определять положение очагов землетрясений с высокой точностью необходимо иметь также достаточно детальное представление о глубинном строении земной коры и верхней мантии в изучаемом регионе. При этом, желательно брать сведения о строении региона не по данным о землетрясениях, а по данным других наблюдений, например, по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ).



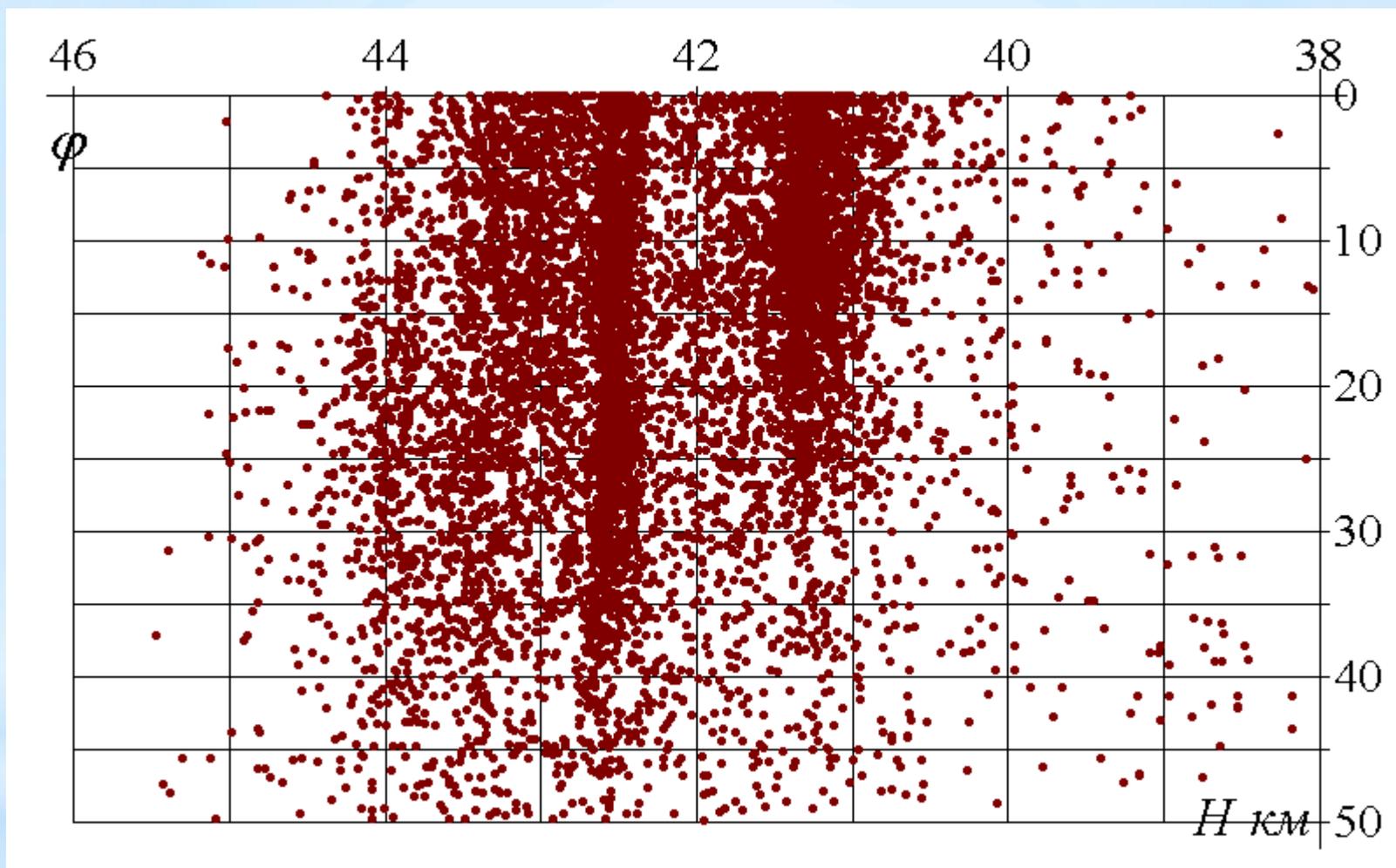
Расположение профилей ГСЗ (отрезки прямых) и сейсмических станций (залитые ромбики).



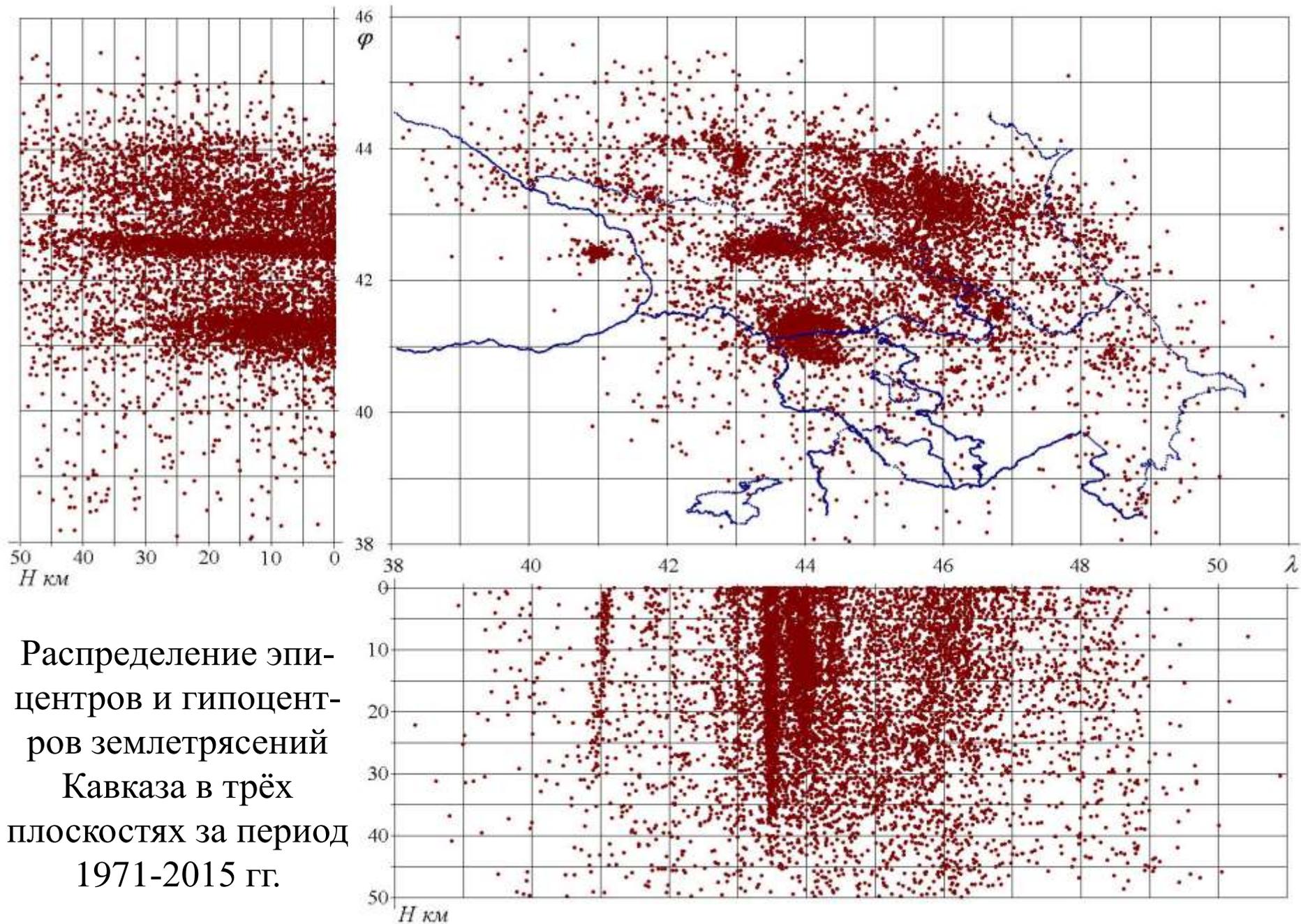
Распределение эпицентров землетрясений Кавказа за период
1971-2012 гг после пересчета.



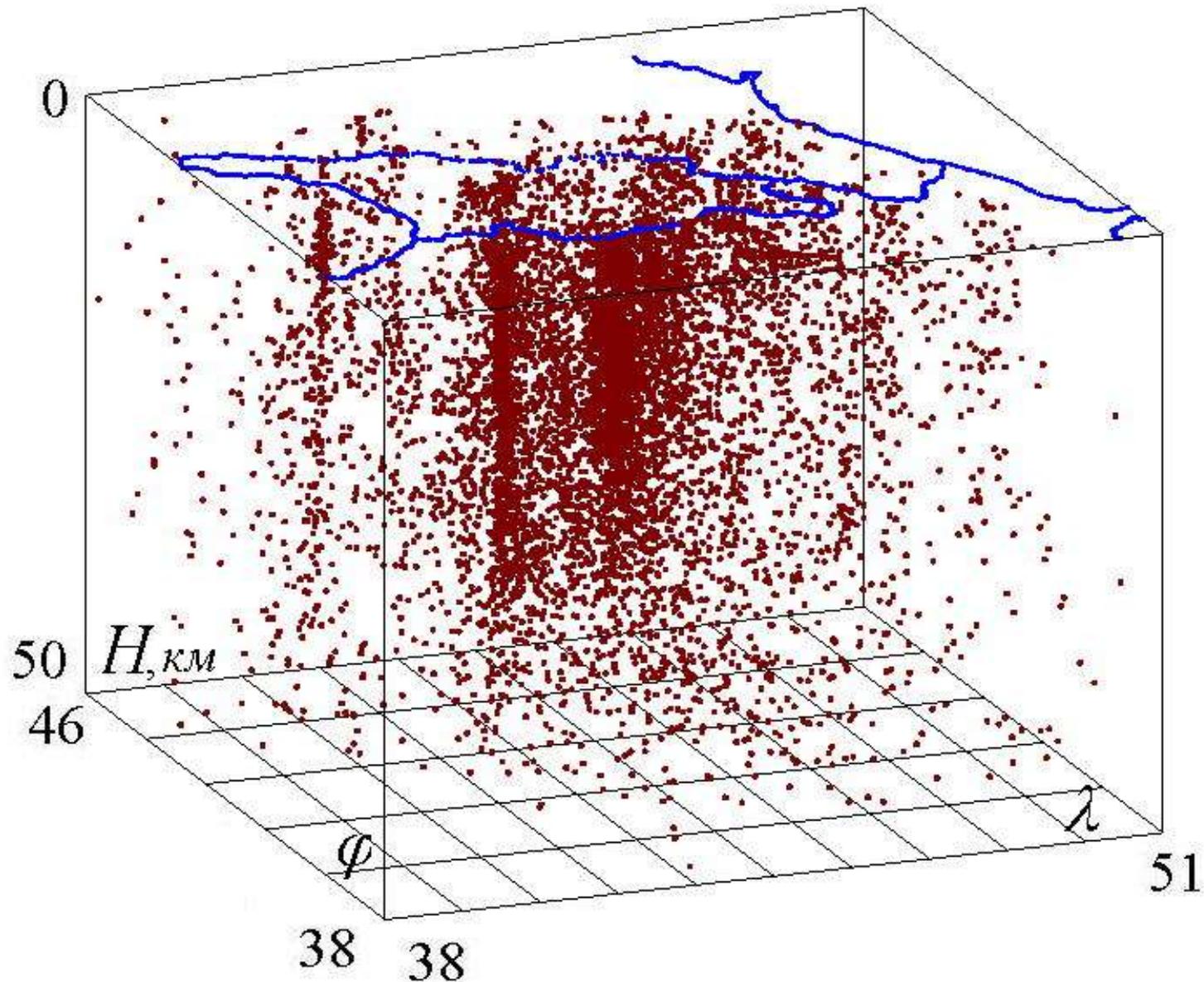
Распределение гипоцентров землетрясений Кавказа до 50 км в широтной плоскости за период 1971-2015 гг.



Распределение гипоцентров землетрясений Кавказа до 50 км в долготой плоскости за период 1971-2015 гг.



Распределение эпи-
центров и гипоцент-
ров землетрясений
Кавказа в трёх
плоскостях за период
1971-2015 гг.



Проекция трехмерного распределения гипоцентров коровых землетрясений Кавказа за период 1971-2015 гг.

Мантийные землетрясения Кавказа

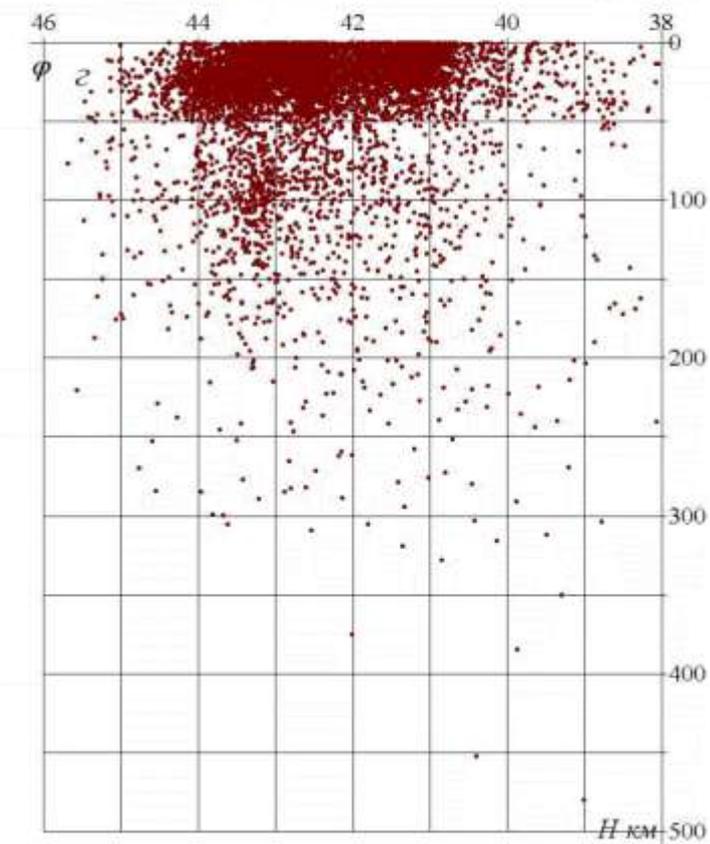
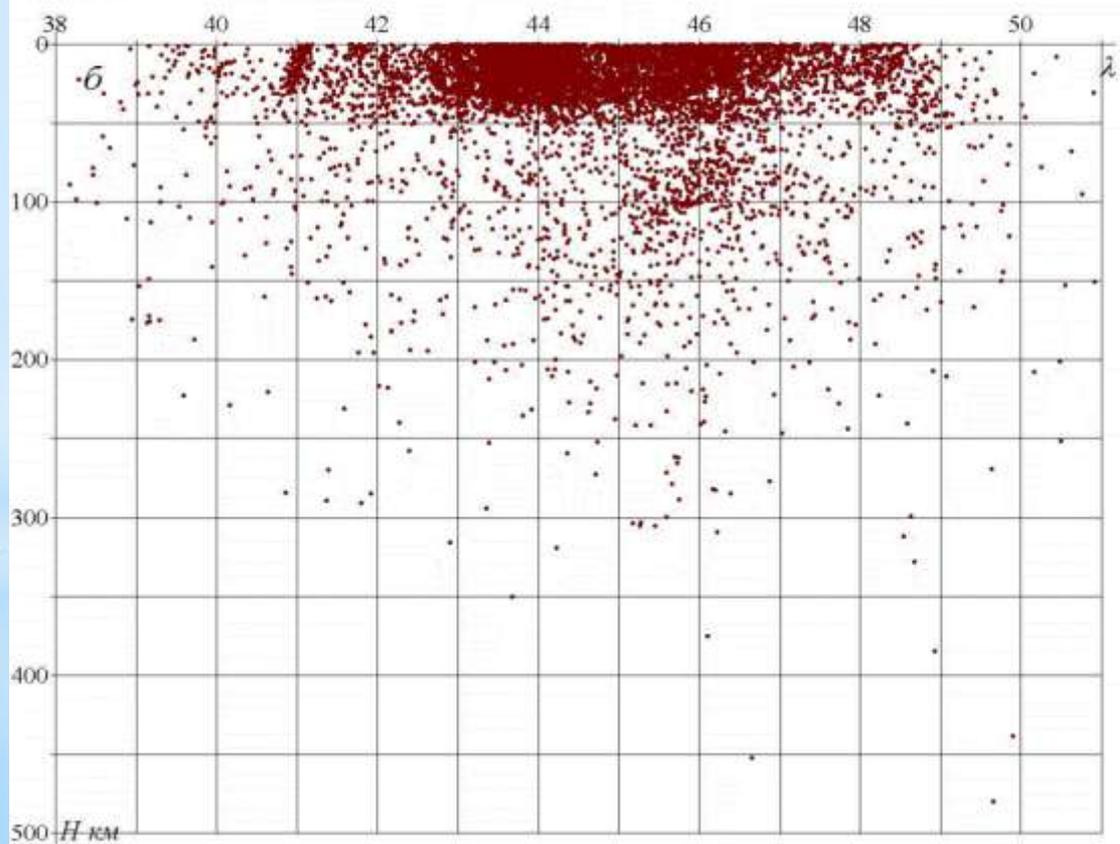
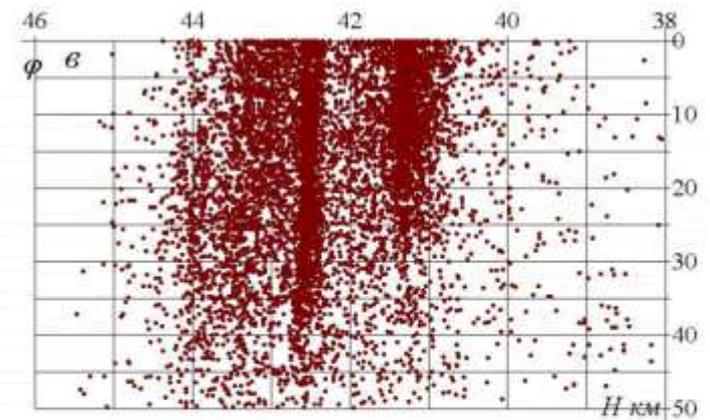
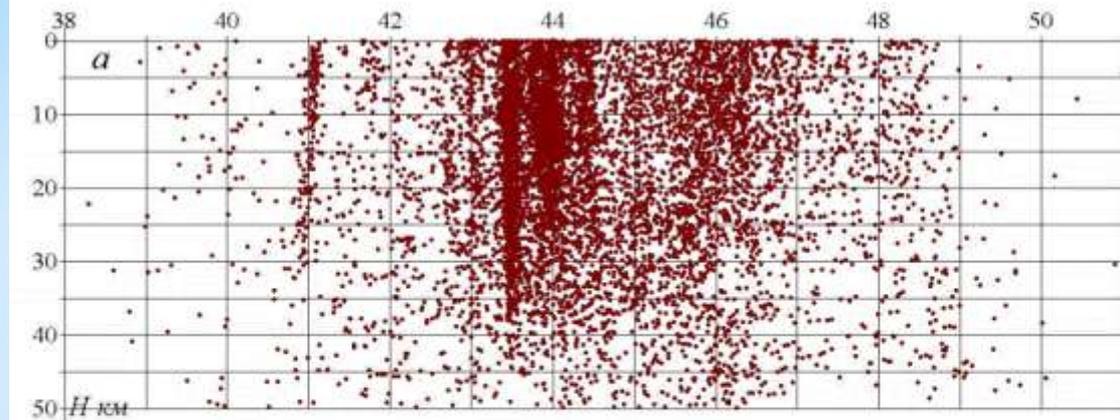
*Камни с неба падать не могут, им там неоткуда
взяться! (Парижская Академия Наук
о метеоритах, 1772 г)*

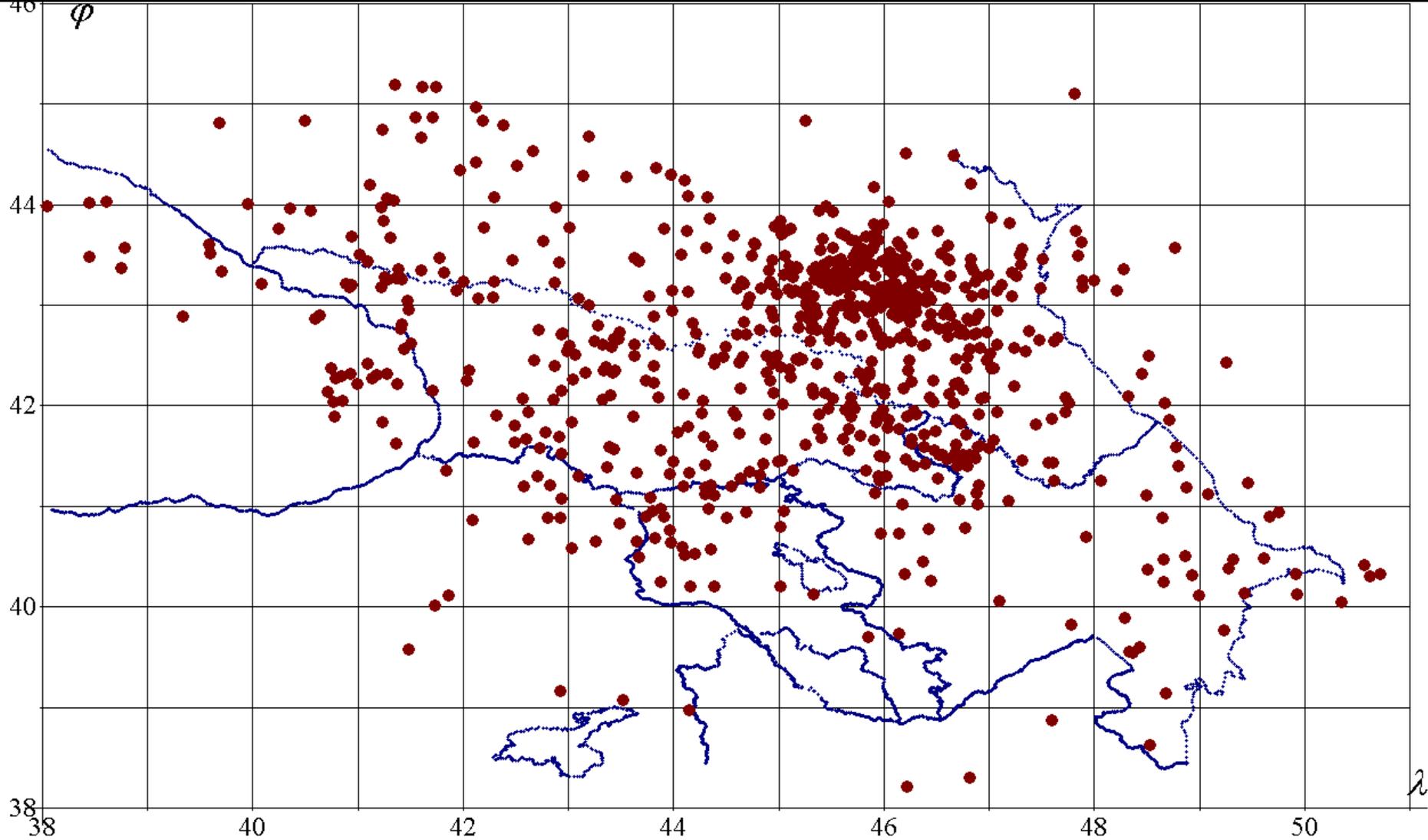
Вопрос существования очагов глубоких землетрясений на Кавказе является чрезвычайно важным как с точки зрения геодинамики, так и с точки зрения сейсмической опасности и сейсмического районирования региона.

Ранее считалось, что на Кавказе могут происходить землетрясения, глубина которых не превышает 150 км.

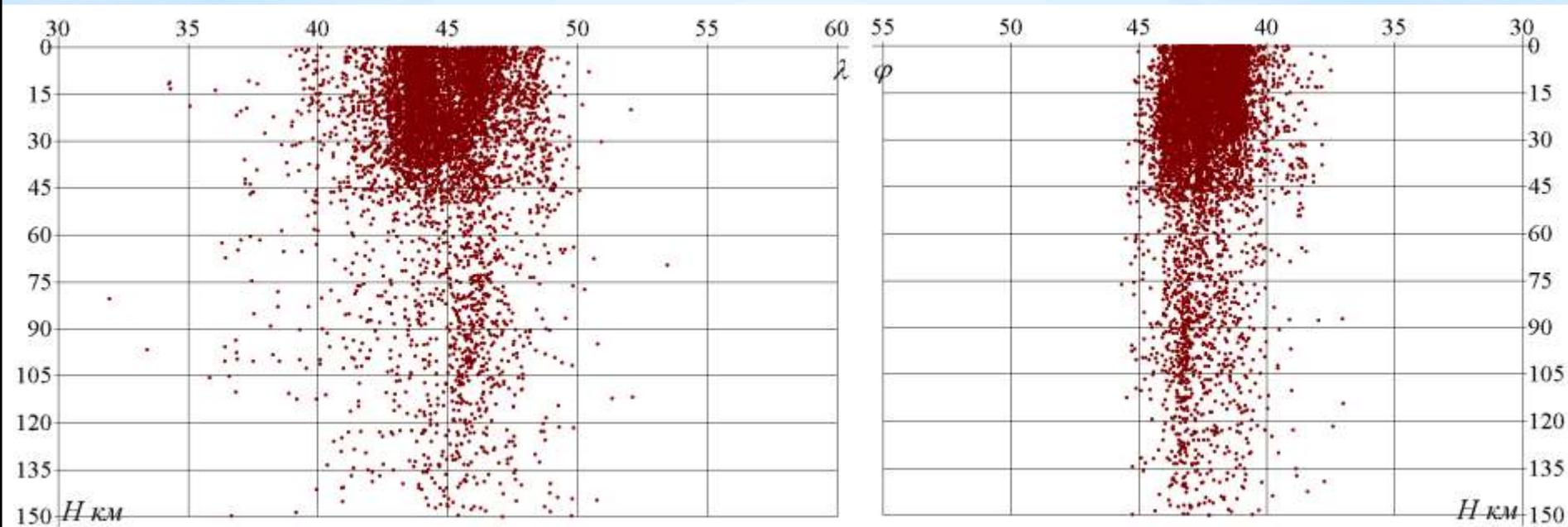
Проведенный анализ каталогов Кавказских землетрясений показал, что в ряде случаев глубины очагов не определены совсем или определены неправильно. Как правило, это касается как раз глубоких землетрясений.

Однако, как показали результаты переопределения координат гипоцентров Кавказских землетрясений с 1971 по 2015 годы в регионе глубины очагов могут достигать 300 км, а в отдельных случаях больших глубин.

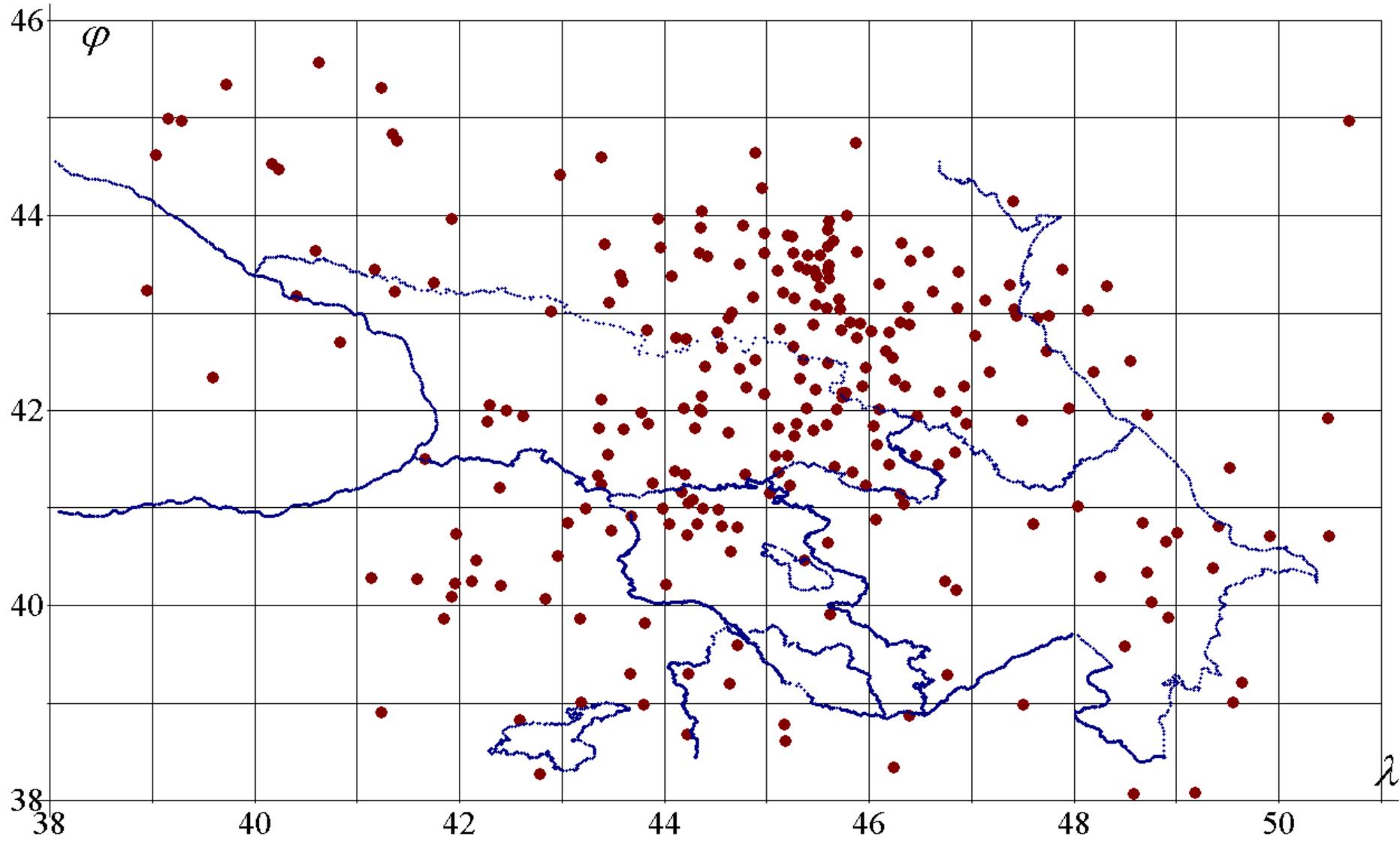




Распределение эпицентров землетрясений Кавказа за период
1971-2015 гг. с глубинами очагов в диапазоне 50 ÷ 150 км

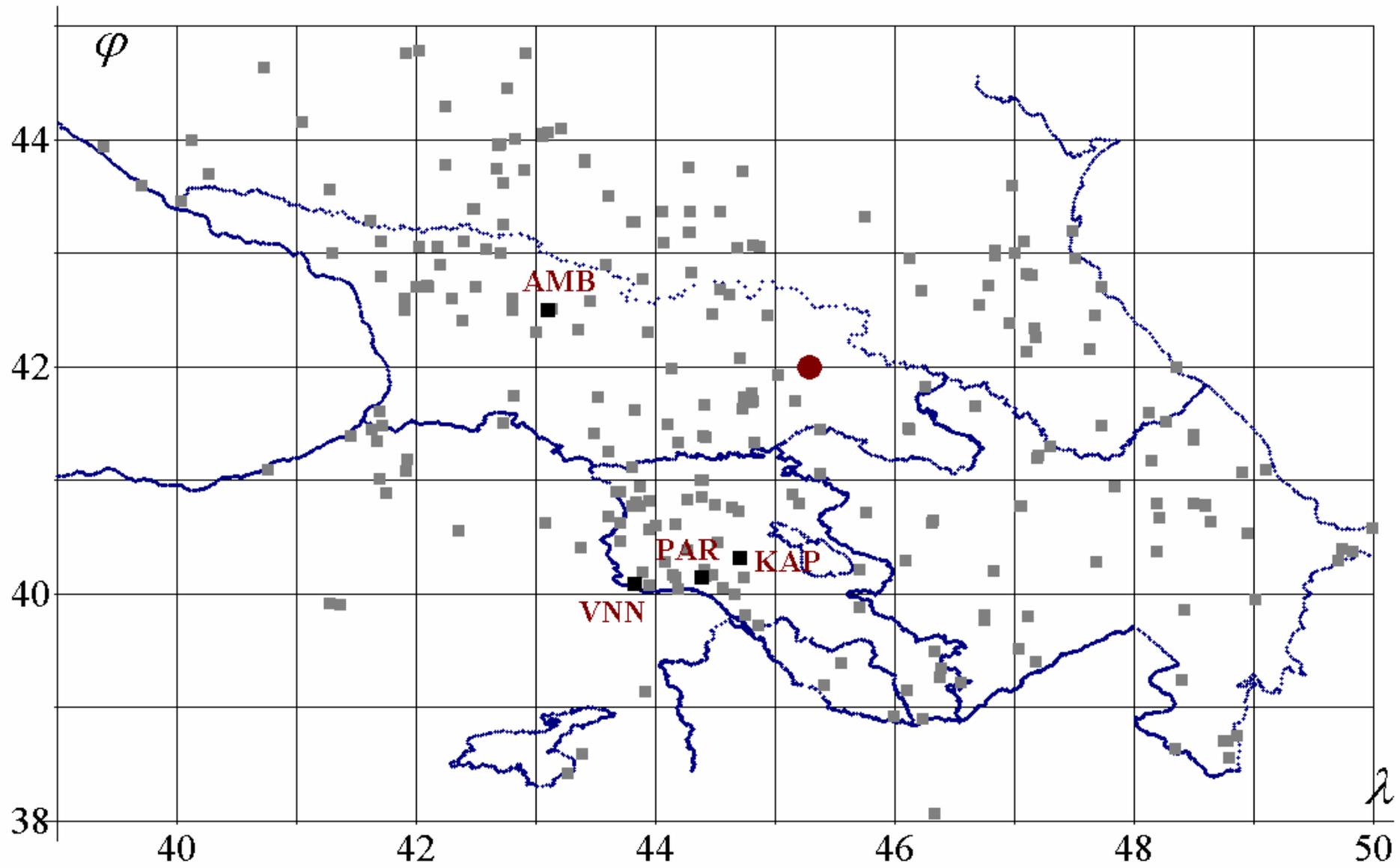


Распределение гипоцентров землетрясений Кавказа в широтном (а) и долготном (б) направлении за период 1971-2015 гг. диапазоне глубин 0 ÷ 150 км

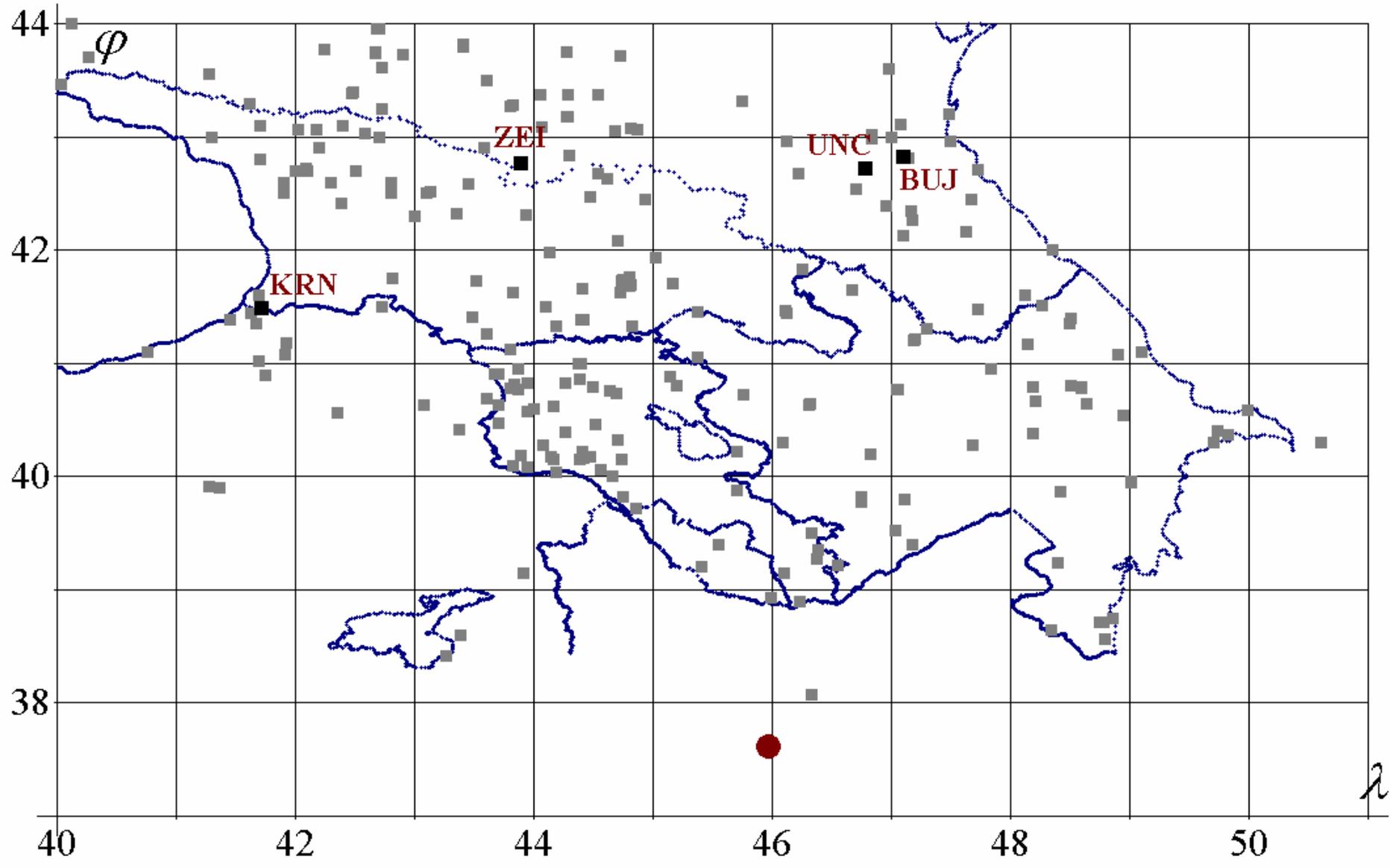


Распределение эпицентров землетрясений Кавказа за период 1971-2015 гг. с глубинами очагов больше 150 км

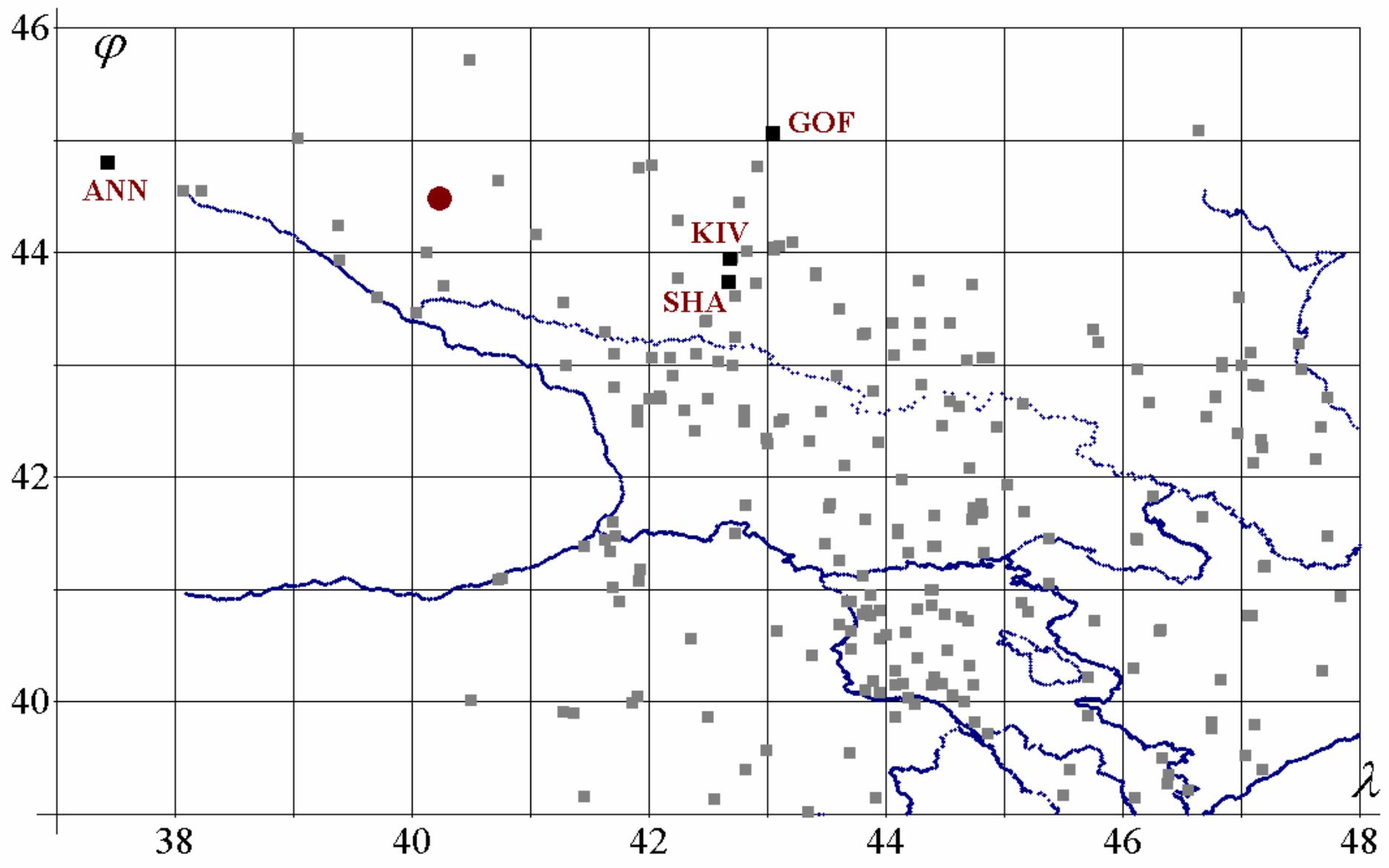
На следующем слайде показан эпицентр землетрясения, глубина которого по нашим определениям равна 438,6 км, а также сейсмические станции всей кавказской сети и станции, зарегистрировавшие землетрясение. Согласно каталогу глубина гипоцентра этого землетрясения равна 5 км. Время в очаге по каталогу равно 13 час 47 мин 57 сек. Время в очаге, полученное по графику Вадати, равно 13 час 46 мин 48,27 сек. Время прихода продольной волны на ближайшую станцию КАР при этом равно 13 час 47 мин 44.6 сек. **То есть согласно каталогу продольная волна пришла на станцию раньше, чем возникло землетрясений.**

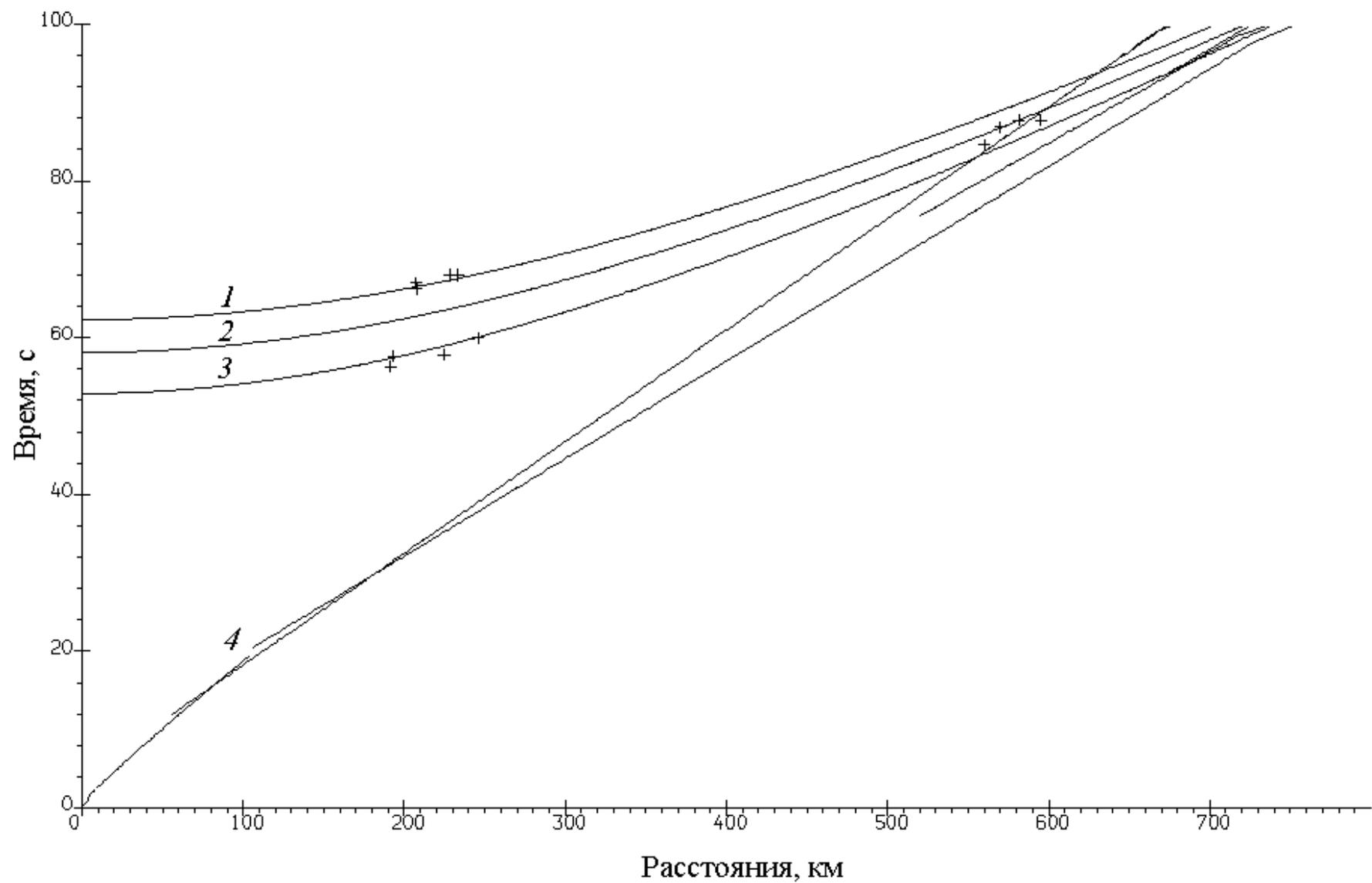


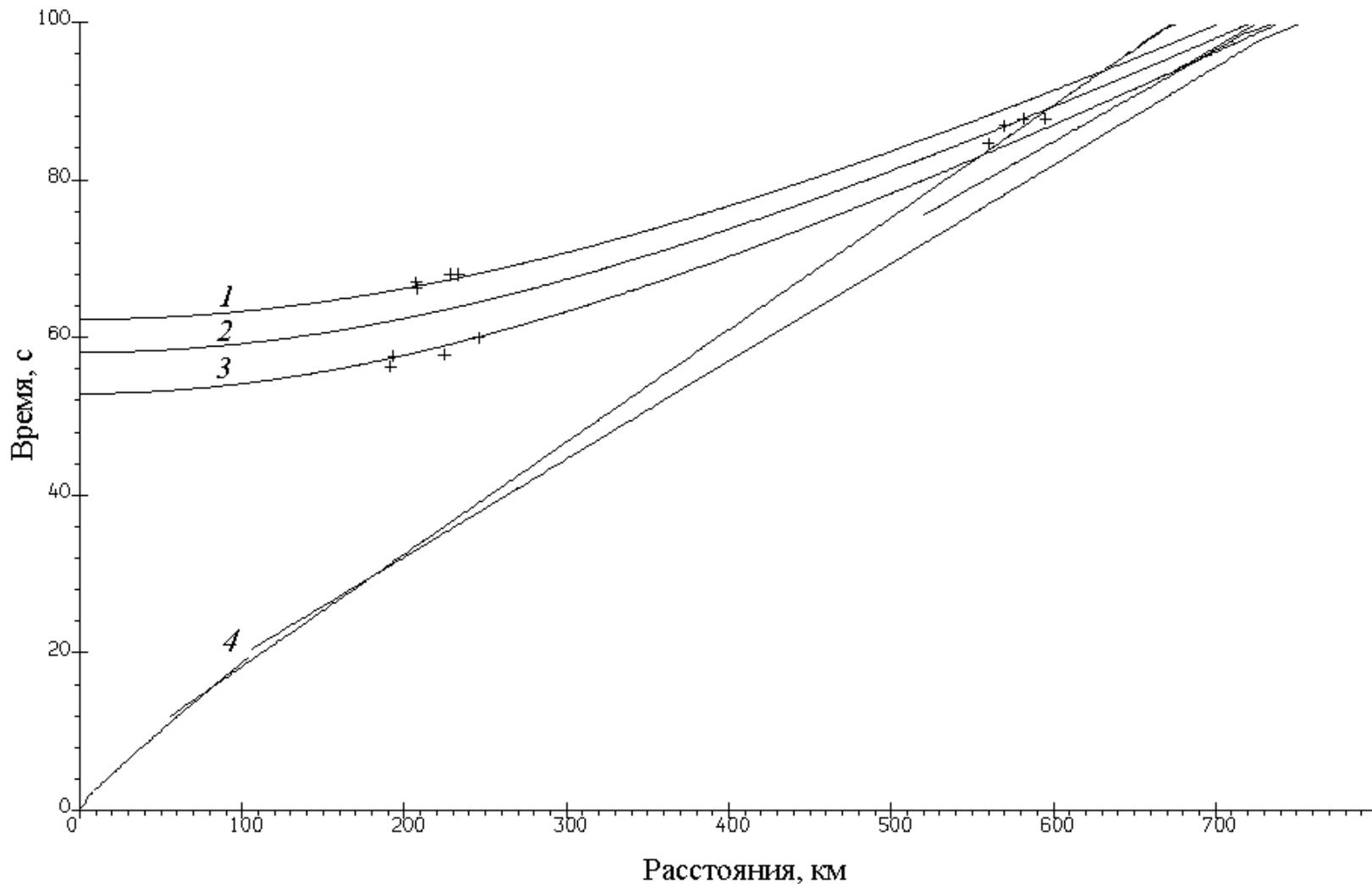
На следующем слайде показан эпицентр землетрясения, глубина которого по нашим определениям равна 486 км. Согласно каталогу глубина гипоцентра этого землетрясения равна 3 км, а время в очаге 07 час 58 мин 16,3 сек. Время же в очаге по графику Вадати равно 07 час 56 мин 56,58 сек. То есть разница составляет 1 мин 19,72 сек. Разница времен прихода поперечной и продольной волны на ближайшую станцию KRN равна $84,2 - 21,2 = 63,0$ секунды. Такое время пробега фиктивной (*S-P*)-волны составляет не меньше 500 км. В тоже время пробег продольной волны по каталогу равен 4,9 секунды, что соответствует гипоцентральному расстоянию максимум 40 км.



Далее показан эпицентр землетрясения с глубиной 527 км. Для этого землетрясения глубина гипоцентра в каталоге не дана. Время в очаге по каталогу равно 00 час 58 мин 49,1 сек. Время в очаге по графику Вадати равно 00 час 57 мин 48,81 сек. И разница составляет 1 мин 00,29 сек. Для этого события разница времен прихода поперечной и продольной волны на ближайшую станцию SNA равна $105.0 - 55.1 = 49.1$ секунды. Такое время пробега фиктивной (*S-P*)-волны составляет не меньше 300 км. В тоже время пробега продольной волны по каталогу равно 6,0 секунды, что соответствует гипоцентральному расстоянию максимум 50 км. Такое несоответствие во временах пробега продольных и фиктивных волн, как в этом случае, так и в предыдущем, говорит о низком качестве обработки сейсмических данных на сейсмических станциях.







На этом слайде показаны теоретические годографы и экспериментальные точки после пересчета для трех наиболее глубоких землетрясений

Из этого рисунка хорошо видно, что пересчитанные координаты хорошо удовлетворяют теоретическим годографам, а годограф первых вступлений от источника 5 км лежит значительно ниже экспериментальных точек. При этом все точки лежат на участке годографов до точки перегиба, то говорит об устойчивом определении глубины гипоцентра.

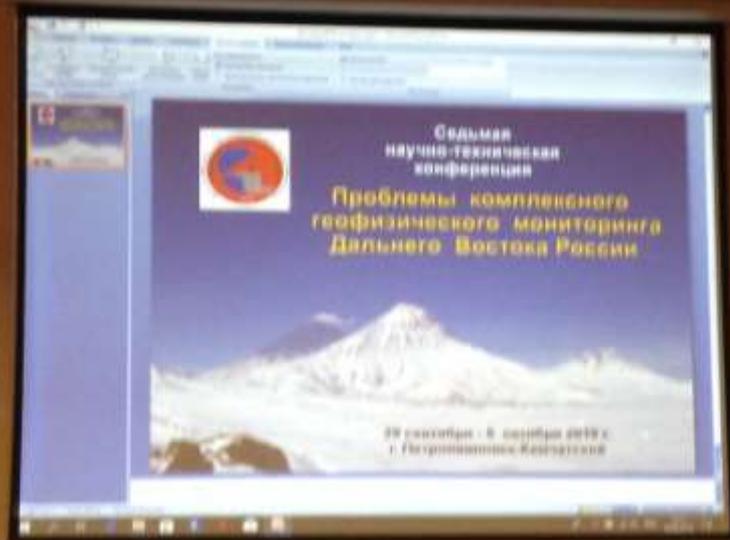
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Помимо этого, привлечение одной скоростной колонки 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.

Для более надежной локации землетрясений на Кавказе, на наш взгляд, целесообразно пользоваться скоростными колонками, полученными методами ГСЗ и КМПВ, и при этом для каждой станции использовать свою колонку 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 сверхдлинных 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.

Показано также, что на Кавказе кроме коровых землетрясений имеют место и глубокие мантийные землетрясения. 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, но очевидно также, что мантийные землетрясения вносят в неё определённый 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.

Хочется отметить одну особенность исходных данных 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?



Спасибо за внимание!