

МЕТОД ДВОЙНЫХ РАЗНОСТЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ГИПОЦЕНТРОВ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ KNET

Н.А. Сычева, С.И. Кузиков

Для более чем 4500 сейсмологических событий по данным сети KNET за 1994–2008 гг. наблюдений применен метод двойных разностей и получен каталог с уточненными их гипоцентрами.

Ключевые слова: землетрясение; гипоцентр; скоростная модель литосферы; метод двойных разностей; кластер.

Введение. Наличие разных версий программного обеспечения для расчета гипоцентров и всевозможных авторских скоростных моделей литосферы неизбежно приводит к различным оценкам пространственного положения очага землетрясения на основе одного и того же исходного материала. На региональные сейсмологические исследования, с мелкомасштабным уровнем обобщения данных, такое различие в определении гипоцентров может и не оказывать существенного влияния. Однако детальный анализ распределения сейсмичности и её связи с другими геофизическими полями или геологическими объектами повышает требования к точности положения очагов землетрясений. В этом смысле вызывает интерес так называемый “метод двойных разностей” [1, 2], который позволяет достаточно эффективно корректировать положение землетрясений и мало зависит от варианта скоростной модели литосферы. С его помощью был получен наиболее точный каталог землетрясений за 1994–2008 гг. наблюдений в районе Центрального Тянь-Шаня.

Метод двойных разностей. Как известно, скоростная модель литосферы позволяет оценить время пути сейсмического луча от источника до регистрирующей станции. В реальности же структура Земли намного сложнее, чем ее описывает любая скоростная модель. Поэтому в рассчитанном времени пробега волны от события к сейсмической станции появляются ошибки вследствие отклонения скоростной модели от строения и свойств реальной среды. Для сглаживания подобного рода несоответствий и корректировки гипоцентров используется метод двойных разностей (МДР), идея и технология применения которого подробно изложена в работах [1, 2]. В первом приближении суть метода заключается в следующем. Два сейсмических события рассматриваются относительно некоторой станции, если расстояние между событиями достаточно мало по сравнению с расстоянием от них до станции. Сейсмические лучи от данной пары близлежащих событий проделывают практически один и тот же путь с одинаковыми скоростными характеристиками до регистриру-

ющей станции. Поэтому в этом случае логично ожидать минимальную разницу во времени прохода волн от пары этих событий к сейсмической станции:

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} = t_k^{i,obs} - t_k^{i,cal} - (t_k^{j,obs} - t_k^{j,cal}), \quad (1)$$

где i и j – пара сейсмических близкорасположенных событий; k – номер исследуемой пары событий; t_k^{obs} – наблюдаемое время прохода волны и t_k^{cal} – рассчитанное время прохода волны. При этом для одного из сейсмических событий отклонение наблюдаемого времени пути волны от вычисляемого времени может быть представлено как:

$$r_k^i = t_k^{i,obs} - t_k^{i,cal} = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i, \quad (2)$$

где Δx^i , Δy^i , Δz^i и $\Delta \tau^i$ – отклонения гипоцентра и времени пробега волны события i .

С учетом (2) выражение (1) можно переписать в виде:

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j. \quad (3)$$

Таким образом, на основе (3) может быть построена система линейных уравнений для всех пар близлежащих сейсмических событий по отношению к каждой регистрирующей станции. После чего вычисляются параметры Δx , Δy , Δz и $\Delta \tau$ путем минимизации величины dr_k^{ij} . Феликс Валдхаузер (Felix Waldhauser) реализовал описанный выше алгоритм для корректировки параметров гипоцентров землетрясений в виде программного обеспечения “hypoDD” [3], программный код которого и его описание доступны на сайте <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of01-113/>. Успешные опыты применения данной программы для различных каталогов землетрясений представлены в работах [4–6].

Исходные данные сети KNET. За 1994–2008 гг. на территории, контролируемой сетью KNET, сотрудниками ИС РАН зарегистрировано и обработано порядка 6000 сейсмических событий (рис. 1).

Расположенные в северной части Центрального Тянь-Шаня 10 сейсмостанций позволяют регистрировать события далеко за пределами их периметра. Основное количество (4980) сейсмических событий за 1994–2008 гг. наблюдений, соответствующих необходимой для анализа плотности распределения, сосредоточено на площади порядка 600×350 км² в пределах $40,5$ – $44,0^\circ$ с.ш. и 72 – 78° в.д. (рис. 1). Однако из них в обработке участвовало только 4514 событий, т.к. данные 1995 г. были исключены из-за отсутствия информация о приходе на станции P - и S -волн. В сумме было обработано 103526 фаз P -волн и 81345 фаз

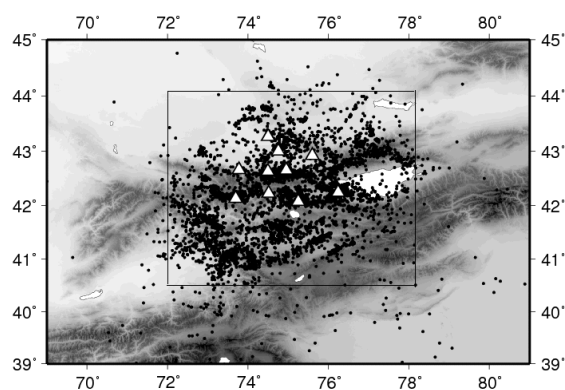


Рис. 1. Распределение сейсмических событий (6270) на территории Тянь-Шаня по данным сети KNET за 1994–2008 гг. наблюдений. Треугольники – станции сети, внутренний прямоугольник – зона локальных сейсмических событий (4980).

S -волн прихода на станции сети KNET. В качестве исходных данных для переопределения положения событий использовался сейсмический каталог землетрясений, полученный на основе 6-слойной скоростной модели литосферы Стива Рекера [7] и расчетов программы HYPOCENTER [8].

Особенности применения hypoDD к данным KNET. Одним из основных понятий алгоритма двойных разностей является “кластер”, который должен включать в себя не менее 8 сейсмических событий, отстоящих друг от друга не далее 8 км. При выполнении программы hypoDD события, не вошедшие ни в один из таких пространственно связанных кластеров, корректировке своей позиции не подлежат. При обработке данных сети KNET были сформированы 178 кластеров, в которые вошли в общей сложности 3499 событий, что составляет ~ 78 % от общего числа исследуемых землетрясений (4514). Следует отметить, что hypoDD может отбраковывать сейсмическое событие не только из-за отсутствия принадлежности его к какому-либо кластеру, но и по причине наличия у события логически проблемных гипоцентров выше поверхности земли.

Показателями качества определения параметров сейсмического события в каталогах являются характеристики: RMS (Root Mean Square) – среднеквадратичная ошибка определения времени прихода P - и S -волн на станции, ERH (Horizontal Error) – ошибка по горизонтали, ERZ (Vertical Error) – ошибка по вертикали. По изменениям этих показателей можно судить и о качестве корректировки гипоцентров в результате работы программы hypoDD.

Таблица 1

Некоторые сравнительные параметры для сейсмических событий в наибольших кластерах до и после применения процедуры МДР

Номер кластера	Количество событий		Средние координаты кластера			Среднее значение RMS (сек)		Средняя пространственная невязка (м)		
	До	После	Широта (°с.ш.)	Долгота (°в.д.)	Глубина (км)	До	После	Ю-С	З-В	Верт.
1	694	663	42.583	74.810	16.93	0.2251	0.0872	21.7	36.6	120.8
2	608	507	42.257	75.703	13.75	0.3231	0.1300	79.7	58.6	390.1
3	416	335	42.178	73.548	11.42	0.3299	0.1537	62.2	63.4	218.4
4	310	288	43.108	74.909	12.36	0.2009	0.0356	13.3	13.6	59.7
5	285	175	41.092	73.534	6.76	0.4299	0.2168	62.4	100.9	162.9
6	157	137	41.678	73.070	10.24	0.3855	0.1837	57.0	60.0	196.0
7	140	119	41.533	74.783	17.51	0.2892	0.1138	44.5	33.5	116.2
8	110	108	43.629	74.284	12.33	0.2450	0.0920	38.3	25.3	105.8

Восемь из 178 кластеров, максимальных по количеству событий, включают в себя от 694 до 110 землетрясений (табл. 1), что в сумме составляет 2720 событий из 3499 (рис. 2). Из данных табл. 1 следует, что в процессе работы huroDD в первоначально выделенных кластерах может быть отбраковано более 100 сейсмособытий (кластер 5). Но при этом, как минимум в 2 и более раз повышается средняя точность по параметру RMS для оставшихся событий.

Из настроечных параметров программы huroDD следует обратить внимание на воз-

можность установки количества циклических итераций обработки данных и на группу характеристик, регулирующих процесс кластеризации. Что касается проблемы выбора рабочих параметров кластеризации, то следует придерживаться рекомендуемых значений в описании [3]. Так как ужесточение этих параметров может незначительно улучшить качество передислокации гипоцентров, но существенно сократить (в нашем случае более чем в 2 раза) количество скорректированных событий на выходе. Выбор числа итераций работы huroDD был определен нами эмпирически. Для всех численно круп-

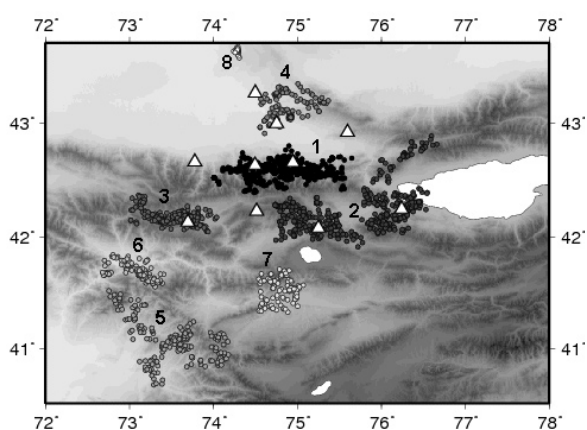


Рис. 2. Положение восьми кластеров с максимальным количеством сейсмических событий на исследуемой территории.

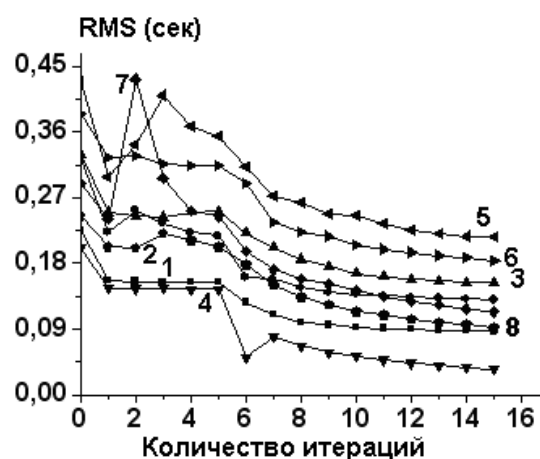


Рис. 3. Изменения RMS как функции итерационного процесса для восьми наибольших кластеров.

Сравнительные характеристики гипоцентров до и после применения программы hypoDD к данным KNET

Наименование параметра	До hypoDD		После hypoDD		Значение смещения	
	мин.	макс.	мин.	макс.	среднее	максимальное
Широта	40°.420	44°.181	40°.423	44°.181	0°.010 (~ 1110 м)	0°.093 (~10.34 км)
Долгота	71°.856	78°.420	71°.853	78°.426	0°.013 (~ 1100 м)	0°.143 (~11.69км)
Глубина (км)	0	28.84	0.04	44.97	5.10 (км)	39.9км

ных кластеров уже на 7–8 итерации достигается сравнительно стабильные и низкие значения RMS, которые при последующих циклах меняются незначительно (рис. 3). Поэтому работу программы hypoDD имеет смысл ограничивать 10 итерациями.

Обсуждение результатов. В результате обработки программой hypoDD 4514 сейсмических событий сети KNET был получен новый каталог из 3499 землетрясений, параметры которых претерпели изменения. Уровень и размах пространственной корректировки этих событий представлен в табл. 2.

Таким образом, если в плане события меняли свое положение сравнительно одинаково по широте и долготе в среднем на 1,1 км, то по глубине гипоцентры скорректированы примерно на 5 км. Некоторые особенности корректировки эпицентров исследуемых событий показаны на рис. 4. Смещения землетрясений в плане менее заметны для зоны 2, находящейся внутри пе-

риметра станций KNET и более существенны в удаленных от сети краевых зонах 1 и 3. При этом в целом происходит формирование более узких сейсмогенерирующих зон.

Рассмотрим усредненные значения ошибок расчета параметров землетрясений (RMS, ERX, ERY, ERZ) до и после применения программы hypoDD (табл. 3). При этом все исследуемые оценки ошибок в 1,5–2 раза становятся меньше относительно исходных событий.

Рассмотрим некоторые из представленных в табл. 3 параметров более подробно. Так, до применения МДР к сейсмическим данным практически все события имели значения RMS в интервале 0,1–1,0 сек (рис. 5). А после обработки программой hypoDD более половины событий по значению RMS перешла в диапазон 0,01–0,1 сек. Наряду с уменьшением более чем в два раза средней ошибки по глубине (ERZ, табл. 3), значительная часть событий, сосредоточенных ранее до 5 км, сместилась на глубину 10 км (рис. 6).

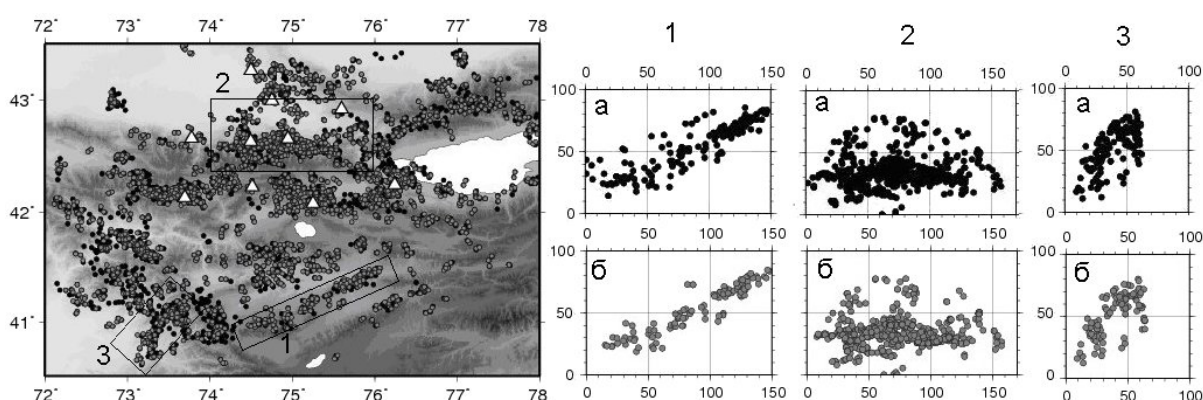


Рис. 4. Совмещенное положение 3499 сейсмических событий до (черные точки) и после (серые точки) применения МДР. Для выделенных на карте зон 1, 2, 3 раздельное положение эпицентров до (а) после (б) применения МДР.

Таблица 3

Средние значения ошибок для сейсмических событий до и после применения программы hypoDD

Этапы исследования	N	RMS (сек.)	ERX (км)	ERY (км)	ERZ (км)
До hypoDD	3499	0.313	1.817	1.817	3.810
После hypoDD	3499	0.144	1.303	1.335	1.771

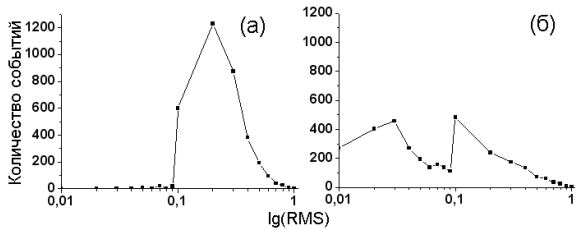


Рис. 5. Зависимость количества событий от RMS: (а) – до, (б) – после hypoDD.

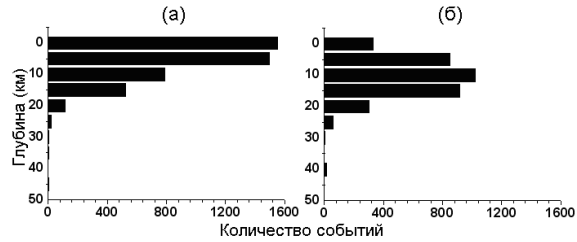


Рис. 6. Распределение землетрясений по глубине: (а) – до, (б) – после hypoDD.

Весьма существенные структурные изменения наблюдаются в распределении сейсмических событий в вертикальных плоскостях (рис. 7). На исходных данных (рис. 7а) наблюдаются узкие строго горизонтальные зоны концентрации событий на глубинах 0,3 и 7 км, которые, скорее всего, связаны с неточностями скоростной модели литосферы (СМЛ). Применение МДР убирает эти горизонтальные зоны, но более четко проявляются субвертикальные зоны концентрации сейсмических событий (рис. 7б).

МДР и скоростные модели литосферы.

Выше отмечалось, что МДР мало зависит от используемой скоростной модели, однако программа hypoDD требует эти данные в качестве дополнительных параметров к исследуемому каталогу землетрясений. Для проверки степени зависимости МДР от скоростной модели при работе hypoDD вместо СМЛ С. Роккера были использованы параметры модели, полу-

ченной в Институте динамики геосфер РАН (ИДГ РАН).

В результате, при тех же параметрах обработки число событий с 3499 уменьшилось до 3306. При этом почти не изменилось пространственное положение оставшихся событий (рис. 8). Усредненные значения ошибок (RMS, ERX, ERY, ERZ) для сейсмических событий после применения программы hypoDD при разных СМЛ представлены в табл. 4. Все анализируемые показатели ошибок для обеих моделей отличаются весьма незначительно и естественным образом для модели С. Роккера ошибки имеют меньшие значения.

Заключение. К каталогу из 4514 сейсмических событий за 1994–2008 гг. наблюдений по данным сети KNET применен метод двойных разностей (программа hypoDD) для уточнения их гипоцентров. В результате был получен новый каталог с скорректированными параметрами

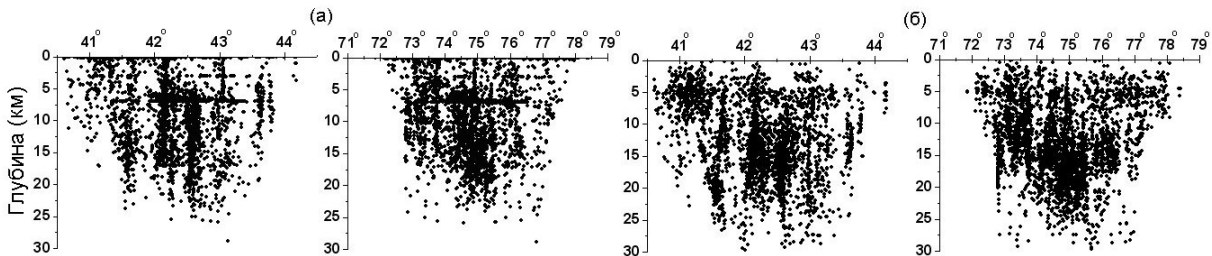


Рис. 7. Интегральные проекции сейсмических событий на вертикальную плоскость в направлениях Юг-Север и Запад-Восток, до (а) и после (б) обработки hypoDD.

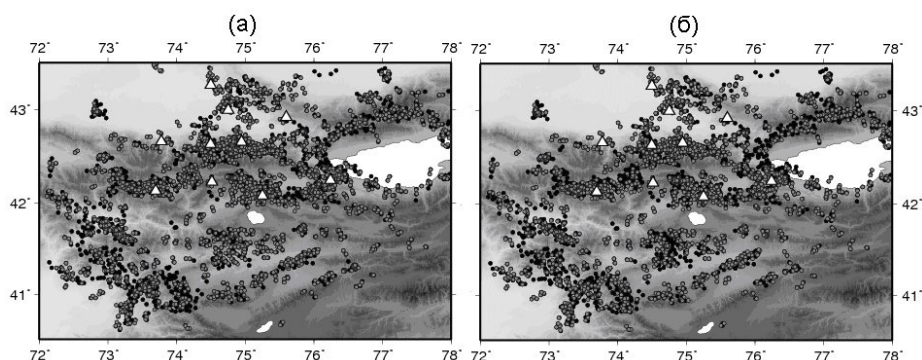


Рис. 8. Положения эпицентров до (черные кружочки) и после (серые точки) применения hypoDD при скоростных моделях: а – С. Роккера; б – ИДГ РАН.

Таблица 4

Средние значения ошибок для сейсмических событий после применения hypoDD при разных скоростных моделях

Скоростные модели литосферы	Количество событий	RMS (сек.)	ERX (км)	ERY (км)	ERZ (км)
Модель Стива Роккера	3499	0.144	1.303	1.335	1.771
Модель ИДГ РАН	3306	0.152	1.331	1.474	1.771

для 3499 сейсмических событий, что составляет ~ 78% от исходного объема данных. При этом среднее изменение гипоцентров по долготе и широте составляет ~ 1,1 км, по глубине 5,1 км.

После передислокации гипоцентров ошибки определения параметров землетрясений (RMS, ERH, ERZ) в среднем уменьшились в 1,5–2 раза. При этом до корректировки гипоцентров преобладающее количество событий располагалось на глубине до 5 км, то после процедуры МДР максимальная частота распределения событий смещается на глубину 10 км.

Уточненный каталог может быть использован не только для анализа отдельных сейсмических событий, но и для структурных исследований сейсмических зон и для сравнения с геолого-геофизическими данными.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИС РАН В.Д. Брагину и Н.Ю. Краснокутской за предоставленные данные по сейсмологической сети KNET.

Исследование частично поддержано грантом РФФИ № 09-05-00687а.

Литература

1. *Waldhauser F. and Ellsworth W.L.* A double-difference earthquake location algorithm: Method

and application to the Hayward Fault, California // *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90. 2000. P.1353–1368.
 2. *Waldhauser F. and Ellsworth W.L.* Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations // *J. Geophys. Res.* 2001.
 3. *Waldhauser F.* HypoDD: A computer program to compute double-difference hypocenter locations // *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.* 2001. 01-113. 25 p.
 4. *Еманов А.А., Лескова Е.В.* Структура афтершокового процесса Чуйского землетрясения // *Вестник НЯЦ РК. Вып. 2(18).* 2004. С. 184–189.
 5. *Stephane Prejean, William Ellsworth, Mark Zoback and Felix Waldhauser.* Fault structure and kinematics of the Long Valley Caldera region, California, revealed by high-accuracy earthquake hypocenters and focal mechanism stress inversion // *Journal of geophysical research.* 2002. Vol.107. № B12,2355. Doi:10.1029/2001JB001168.
 6. *Yang Z.X., Waldhauser F., Chen Y.T. & Richards P.G.* Double-difference relocation of earthquakes in central-western China, 1992–1999 // *Journal of Seismology.* 1999.
 7. *Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R. and Munirova L.* Three-Dimensional Elastic Wave Velocity Structure of the Western and Central

Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов, В.Н. Сычев

Tien-Shan //Journal of Geophysical Research.
1993. Vol.98. №B9. P.15779–15795.

8. *Barry R. Lienert, E. Berg and L. Neil Frazer*. Hypocenter: An Earthquake Location Method Using

Centered , Scaled, and Adaptively Damped Least Squares // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol.76. №3. June 1986. P.771–783.