

УДК 550.34.012

АНАЛИЗ СКОРОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЛИТОСФЕРЫ ТЯНЬ-ШАНЯ И МЕТОД ДВОЙНЫХ РАЗНОСТЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ ГИПОЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ *KNET*

© 2012 г. Н.А. Сычева, С.И. Кузиков

Научная станция РАН, г. Бишкек, Киргизия

Проведен сравнительный анализ четырех наиболее известных скоростных моделей литосферы Центрального Тянь-Шаня, предложенных Институтом сейсмологии НАН Киргизии, Т.П. Грином (Киргизия), Стивом Реккером (США), Институтом динамики геосфер РАН. Установлено, что по параметрам точности для определения положения гипоцентров землетрясений в исследуемом регионе более предпочтительны модели Стива Реккера и Института динамики геосфер РАН. Однако модель Т.П. Грина более адекватно описывает скоростное строение земной коры в пределах территории, ограниченной периметром сети *KNET*; эта модель позволяет получить гипоцентры локальных событий с минимальными ошибками.

Более чем 4.5 тыс. сейсмологических событий, зарегистрированных станциями сети *KNET* в 1994–2008 гг., были проанализированы с применением метода двойных разностей; примерно для 3.5 тыс. событий получен каталог с уточненным положением гипоцентров. Среднее изменение положения гипоцентров по долготе и широте составляет около 1.1 км, по глубине – 5.1 км; ошибки определения параметров землетрясений при этом в среднем уменьшились в 1.5–2 раза.

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

Введение

Для сейсмологических исследований территории Центрального Тянь-Шаня на основе данных сети *KNET* [Сычева и др., 2005] сотрудниками Научной станции РАН (НС РАН) обычно используется постоянно пополняемый каталог землетрясений, опирающийся на расчеты по программе *HYPOCENTER* [Barry et al., 1986] и шестислойную скоростную модель С. Реккера [Roedeker et al., 1993]. Привлечение других версий программного обеспечения для расчета гипоцентров и разных 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 ее связи с другими геофизическими полями или геологическими объектами повышает требования к точности определения положения очагов землетрясений, дать объективную оценку которой в каталоге, основанном на тех или иных условиях расчета, в настоящее время, к сожалению, не представляется возможным.

Как известно, значительная доля ошибки при вычислении параметров гипоцентра возникает из-за неадекватности используемой скоростной модели литосферы и, как следствие, неточного расчета расстояний от очага землетрясения до сейсмических станций. Поскольку для территории Тянь-Шаня существует несколько авторских ско-

ростных моделей, выбор наиболее адекватной из них обеспечит более достоверный результат при расчете пространственного положения сейсмического события.

Основная цель данной работы – анализ наиболее известных скоростных моделей и выбор наилучшей из них для более качественного расчета параметров гипоцентров. Помимо этого, представляет интерес рассмотрение так называемого “метода двойных разностей” [Waldhauser, Ellsworth, 2000, 2002], который мало зависит от выбранной скоростной модели и позволяет достаточно эффективно корректировать в каталоге положение гипоцентров землетрясений.

Анализ скоростных моделей литосферы Тянь-Шаня

Скоростные модели. Из существующих сегодня скоростных моделей литосферы Центрального Тянь-Шаня для сравнительного анализа были выбраны четыре: модель Института сейсмологии НАН Киргизии (I), модель Т.П. Грина (II) [Грин, 1990], модель С. Реккера (III) [Roecker et al., 1993] и модель Института динамики геосфер РАН (IV) [Земная ..., 2006]. По сути каждая из этих моделей представляет собой вариант горизонтально-слоистой литосферы с индивидуальными значениями скоростей прохождения сейсмических волн в каждом слое (табл. 1). Основные различия моделей – количество горизонтальных слоев, глубины границ раздела, значения скоростей P - и S -волн в каждом слое. Графики скорости распространения P -волн по глубине для каждой из рассматриваемых моделей приведены на рис. 1.

Таблица 1. Параметры исследуемых моделей литосферы Тянь-Шаня:
 H , км – глубина верхней границы слоя; V_P , км/с, V_S , км/с – скорости распространения P - и S -волн в слое

Модель I. Институт сейсмологии НАН Киргизии											
H , км	0	2.3	8.5	15	30	50					
V_P , км/с	5.00	5.90	6.20	6.50	7.00	8.00					
V_S , км/с	2.97	3.45	3.60	3.78	4.07	4.65					
Модель II. Т.П. Грин (Киргизия)											
H , км	0	2.5	5	7.5	10	15	18	24	30	40	50
V_P , км/с	5.20	5.69	5.82	5.91	6.00	6.19	6.34	6.60	6.90	7.40	7.90
V_S , км/с	3.05	3.32	3.39	3.44	3.48	3.59	3.68	3.82	3.95	4.27	4.56
Модель III. С. Реккер (США)											
H , км	0	3	7	17	27	38	50				
V_P , км/с	5.00	5.80	6.05	6.20	6.40	6.85	8.05				
V_S , км/с	2.85	3.35	3.50	3.60	3.71	3.92	4.55				
Модель IV. Институт динамики геосфер РАН (Россия)											
H , км	0	5	10	20	35	50	75				
V_P , км/с	5.02	5.89	6.18	6.33	6.41	7.97	8.19				
V_S , км/с	2.90	3.40	3.57	3.66	3.70	4.43	4.55				

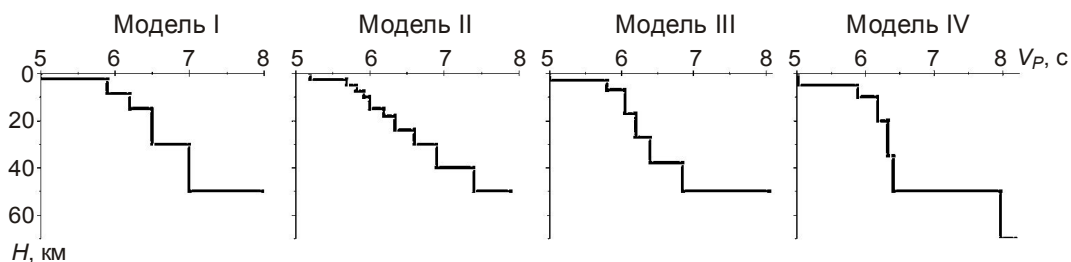


Рис. 1. Скорости распространения P -волн по глубине для исследуемых моделей

Исходные данные (каталоги). Сравнительный анализ рассматриваемых скоростных моделей литосферы проводился на основе соответствующих им четырех каталогов, полученных с использованием программы *HYPOCENTER* при обработке бюллетеней сейсмических событий за 2000–2008 гг. на территории Центрального Тянь-Шаня, начиная с класса 6 (рис. 2). Анализировались две выборки: региональная, охватывающая все события на территории 40.5–43.5°с.ш. и 72–78°в.д., и локальная, включающая в себя только события на территории, ограниченной координатами 42–43.3°с.ш. и 73.5–76.5°в.д.

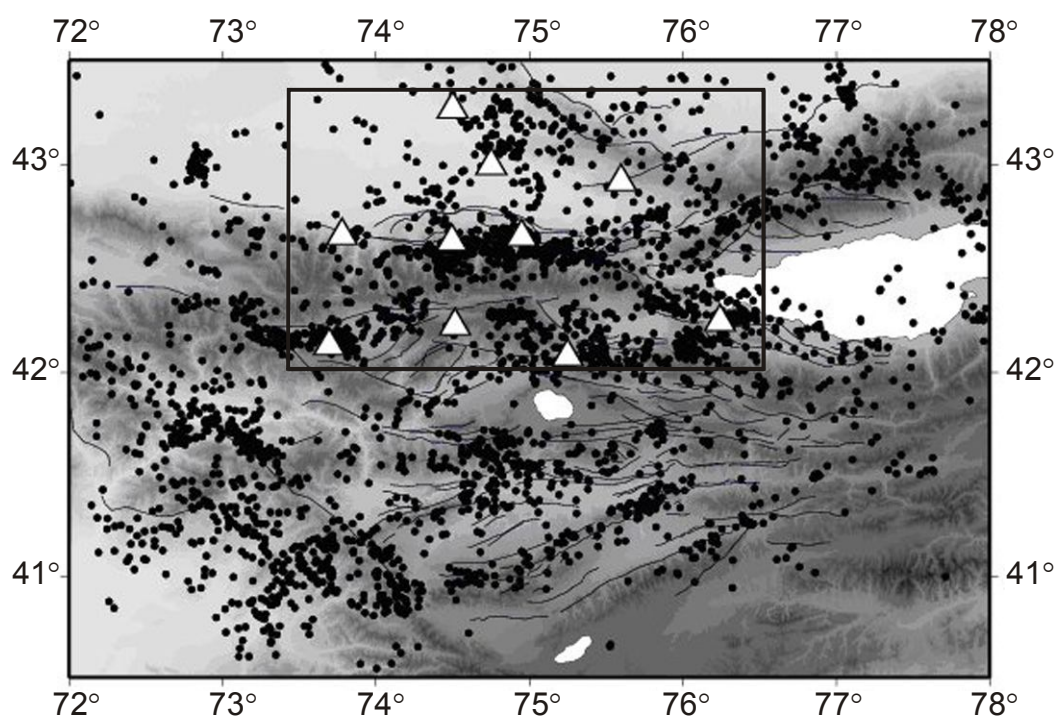


Рис. 2. Скоростная модель литосферы III. Распределение сейсмических событий на территории Центрального Тянь-Шаня: региональная выборка – все события; локальная – события, попадающие в область, ограниченную прямоугольником. Треугольники – станции сети *KNET*

В зависимости от скоростной модели в региональную и локальную рамки территорий может попадать различное число землетрясений (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения среднеквадратичной ошибки определения времени прихода *P*- и *S*-волн на станции (*RMS*), ошибок по горизонтали (*ERH*) и вертикали (*ERZ*) для событий регионального и локального охвата, полученные для разных скоростных моделей литосферы. Заливкой выделены минимальные значения ошибок

Модель	Региональные события				Локальные события			
	Число событий, <i>N</i>	<i>RMS</i> , с	<i>ERH</i> , км	<i>ERZ</i> , км	Число событий, <i>N</i>	<i>RMS</i> , с	<i>ERH</i> , км	<i>ERZ</i> , км
I	4095	0.46	3.49	4.21	1860	0.30	1.10	1.94
II	4095	0.45	3.33	3.88	1899	0.29	1.09	1.79
III	4095	0.36	2.17	4.31	1924	0.31	1.15	4.16
IV	4095	0.32	1.75	5.94	1917	0.29	1.07	5.71

Выбор границ регионального плана обусловлен стремлением охватить как можно большее количество событий, зафиксированных сетью *KNET*, но при этом не включать территории с малой плотностью землетрясений. Локальная территория ограничена пространственным положением сейсмостанций, что позволяет в ее пределах максимально качественно оценить параметры землетрясений.

Анализ каталогов, рассчитанных для разных скоростных моделей литосферы

Каталоги, полученные с использованием программы *HYPOCENTER*, содержат координаты эпицентра, глубину и энергетический класс каждого из сейсмических событий, *RMS*, *ERH* и *ERZ*. Средние значения трех последних параметров (см. табл. 2) позволяют в первом приближении оценить качество информации, содержащейся в каждом из четырех каталогов.

Как уже отмечалось выше, определение положения гипоцентров землетрясений зависит от вида скоростной модели литосферы, поэтому в одних и тех же пространственных рамках локальной или региональной территории фиксируется различное число событий (см. табл. 2). Однако объем анализируемой выборки не может служить критерием преимущества той или иной скоростной модели и приводится лишь для количественной оценки анализируемых данных.

При определении гипоцентров событий модели IV и II выгодно отличаются по числу минимальных средних невязок (см. табл. 2). Однако модель IV имеет максимальные ошибки в определении вертикальной компоненты *ERZ* и для локальной, и для региональной выборок. С учетом всех ошибок, пожалуй, наиболее точной является модель II, особенно в локальной области данных. Согласно рис. 1, она является более детальной на глубинах 2–10 км и, скорее всего, наиболее адекватно описывает среду в этом объеме земной коры. Высокие средние значения *ERZ* у моделей III и IV обусловлены тем, что для них ряд событий имеет максимальные ошибки по вертикали – 99.9 км; при этом для модели IV таких событий больше, чем для модели III (рис. 3).

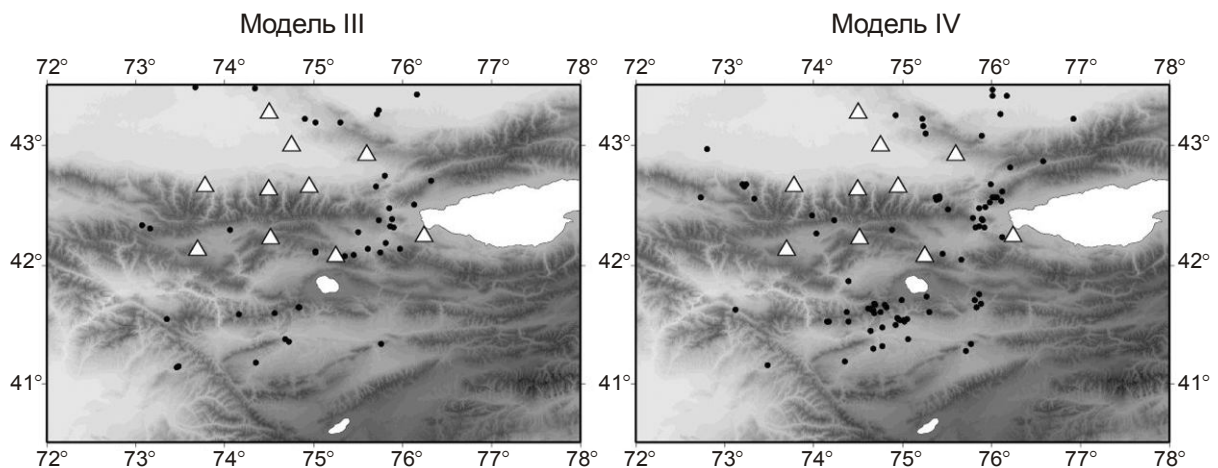


Рис. 3. Положение сейсмических событий, при вычислении гипоцентров которых возникают большие значения *ERZ* (99.9 км) для моделей III (слева) и IV (справа)

Одной из важных оценок качества расчета параметров землетрясения является невязка времени прихода сейсмических волн на регистрирующие это событие станции (*RMS*). Надо заметить, что невязка времени прихода *P*-волны на сейсмостанции, составляющая 0.1 с, может дать погрешность определения расстояния от станции до очага в среднем ~600 м.

На рис. 4, *а* представлена зависимость количества событий от значений RMS , рассчитанных для моделей I–IV по региональным выборкам землетрясений. Обращают на себя внимание два момента. Во-первых, для моделей I и II в интервалах 0.2–0.3 с максимальное количество событий не превышает уровня 830–870; во-вторых, отмечается повышенное количество событий с $RMS \geq 0.6$ с. Для моделей III и IV, напротив, в диапазоне 0.2–0.3 с максимум отмечается на уровне 1300–1400, а событий с $RMS \geq 0.6$ с сравнительно мало.

Для локальной выборки (рис. 4, *б*) независимо от модели значения RMS практически всех событий не превышают 0.6 с; различия проявляются только в значениях максимумов RMS . Суммарное количество событий в рассматриваемом диапазоне для всех моделей близко – 1803 (I), 1833 (II), 1893 (III) и 1900 (IV).

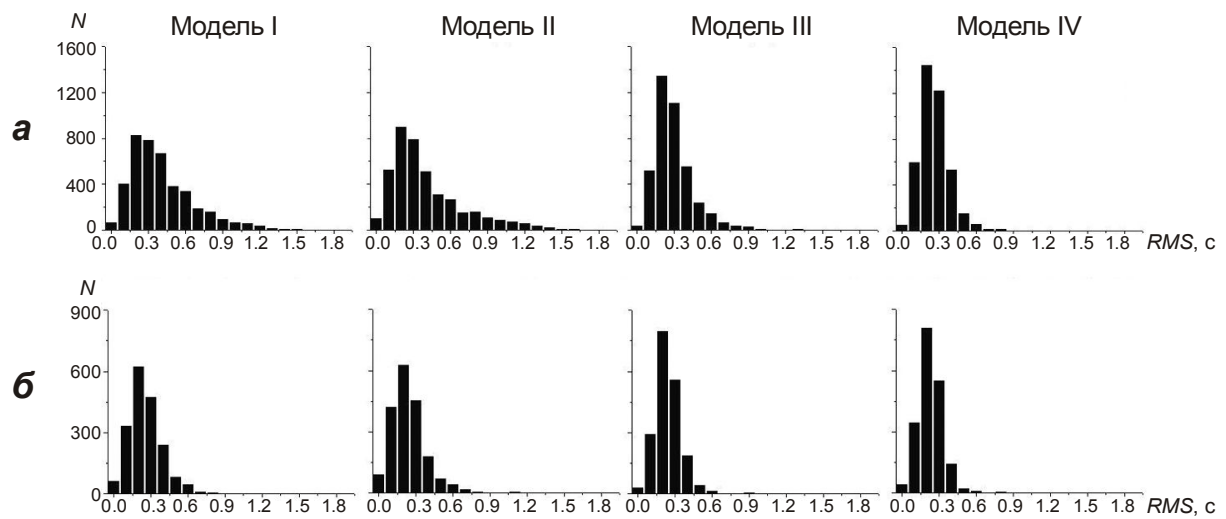


Рис. 4. Распределение количества событий в зависимости от RMS для землетрясений, рассчитанных по моделям I–IV: *а* – региональная выборка; *б* – локальная выборка

Данные, приведенные в табл. 3, позволяют оценить количественное и процентное распределение сейсмических событий для каждой исследуемой модели относительно трех показательных диапазонов RMS .

Таблица 3. Количественное и процентное распределение региональных сейсмических событий по диапазонам RMS для скоростных моделей I–IV

Модель	Диапазоны RMS , с					
	$0 \leq RMS < 0.2$		$0.2 \leq RMS \leq 0.6$		$RMS > 0.6$	
	N	%	N	%	N	%
I	467	11.41	2692	65.74	936	22.85
II	625	15.27	2534	61.88	936	22.85
III	554	13.53	3254	79.47	287	7.00
IV	644	15.72	3356	81.96	95	2.32

В региональном плане наибольшие относительные количества событий с невязками $RMS < 0.2$ с (15.72 %) и ≤ 0.6 с (97.68%) отмечаются для модели IV; наихудшие соответствующие показатели (11.41% и 77.15%) – для модели I. Максимальные различия в процентных показателях между моделями по мере увеличения значений RMS в диапазонах увеличиваются: $15.72 - 11.41 = 4.31$; $81.96 - 61.88 = 20.08$; $22.85 - 2.32 = 20.53$ (см. табл. 3).

Пространственное распределение землетрясений в зависимости от анализируемых диапазонов RMS и скоростной модели представлено на рис. 5. События с $RMS < 0.2$ с для всех моделей, в основном, сосредоточены внутри сети $KNET$ или в ее ближайших окрестностях (рис. 5, *а*). События с $0.2 \leq RMS \leq 0.6$ с распределены примерно равномерно по всей территории региона; их распределение схоже для всех моделей (рис. 5, *б*). Для событий с $RMS > 0.6$ с, в основном, характерно “центробежное” положение у границ исследуемой площади за пределами краевых станций сети $KNET$ (рис. 5, *в*). Обращает на себя внимание обилие событий за пределами локальной территории для моделей I и II (рис. 5, *в*).

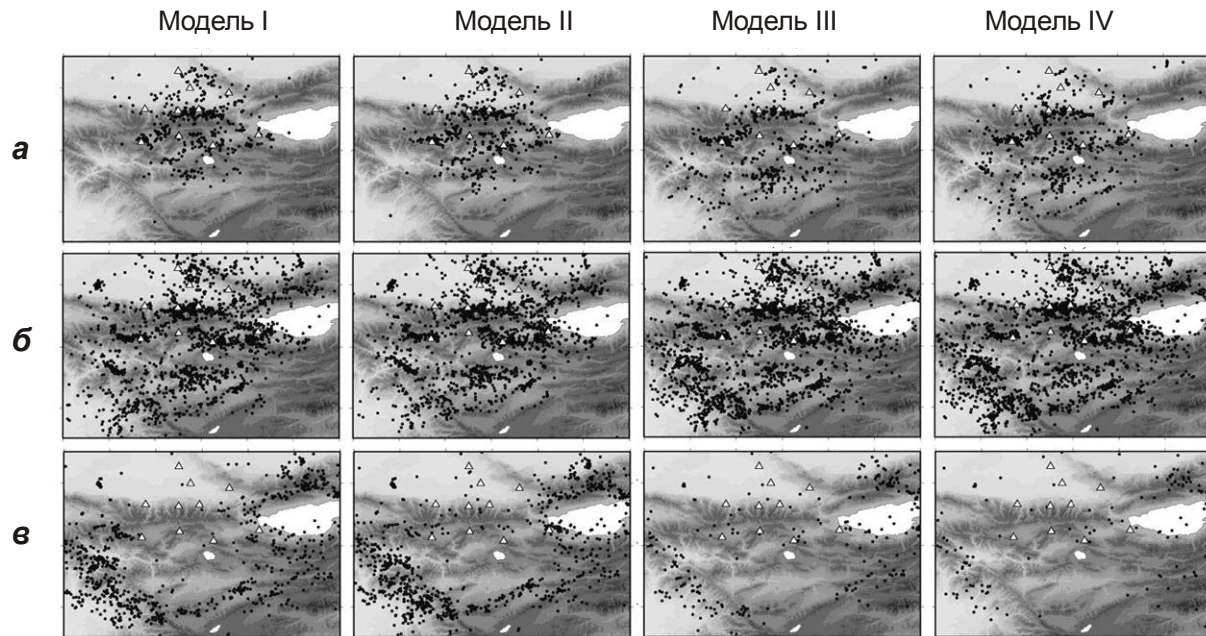


Рис. 5. Распределение сейсмических событий с различным уровнем временных невязок RMS для исследуемых скоростных моделей I–IV: *а* – $RMS < 0.2$ с; *б* – $0.2 \leq RMS \leq 0.6$ с; *в* – $RMS > 0.6$ с

Рассмотрим оценочный параметр ERH , характеризующий точность определения положения события в горизонтальном плане, анализируя гистограммы зависимости количества землетрясений от ERH для всей исследуемой (региональной) территории (рис. 6, *а*) и в рамках локального контура сети $KNET$ (рис. 6, *б*). Частотные распределения свидетельствуют, что в региональном плане наблюдается улучшение показателей по ERH от модели I к модели IV (рис. 6, *а*). Подавляющее большинство событий для моделей III и IV имеет горизонтальные ошибки ≤ 5 –6 км, тогда как для моделей I и II повышенные частоты характерны при $ERH > 5$ км (рис. 6, *а*). Для локальной территории трудно по ERH отдать предпочтение той или иной модели, так как они имеют примерно идентичное распределение горизонтальных ошибок (рис. 6, *б*).

Распределение числа событий в зависимости от вертикальных ошибок ERZ для исследуемых моделей представлены на рис. 7. В случае региональной выборки (рис. 7, *а*) выгодно отличаются модели III и IV – для значительной доли событий ошибки лежат в интервале до ≤ 6 –7 км. Количество событий с вертикальными невязками более 6–7 км сравнительно больше для моделей I и II.

Диаметрально противоположная картина наблюдается для локальной выборки (рис. 7, *б*): определения глубины событий наиболее точны для моделей I и II, ERZ почти для всех событий не превышает 5 км.

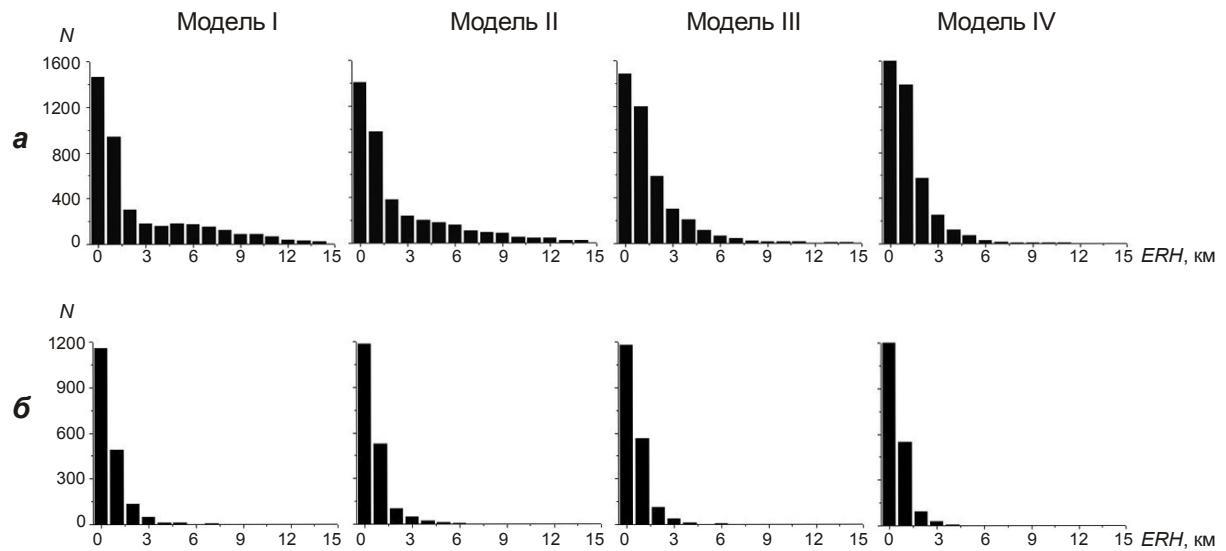


Рис. 6. Гистограммы распределения количества событий N в зависимости от значения параметра ERH для событий, рассчитанных по моделям I–IV: a – весь исследуемый регион; b – локальная территория внутри сети $KNET$

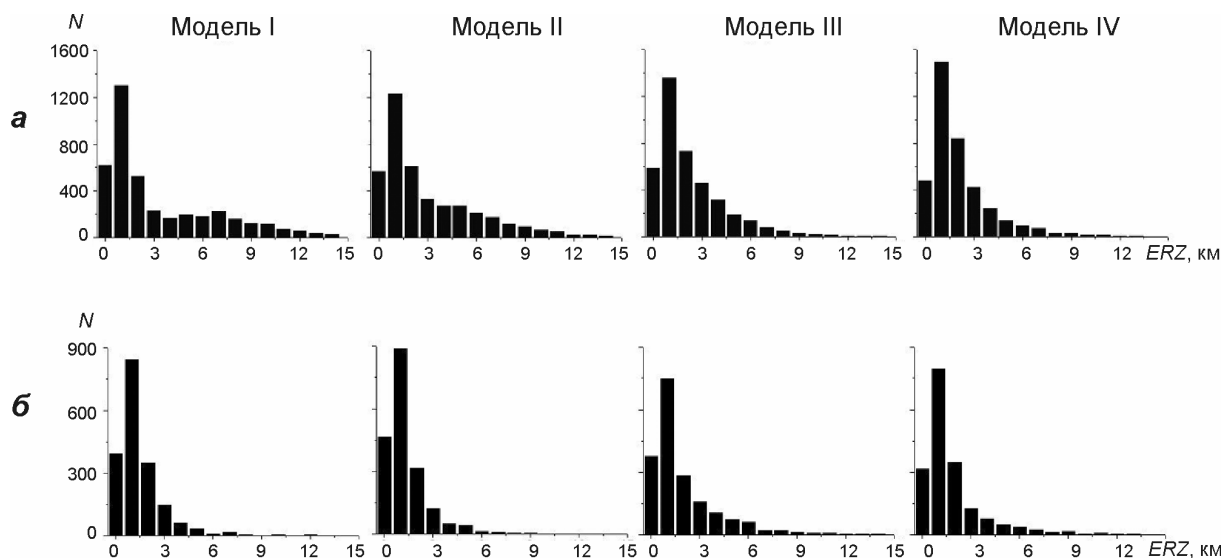


Рис. 7. Гистограммы распределения количества событий N в зависимости от значения параметра ERZ для событий, рассчитанных по моделям I–IV: a – весь исследуемый регион; b – локальная территория внутри сети $KNET$

Совмещенные карты каталогов малоинформативны для выявления преимуществ той или иной модели. Однако они представляют интерес для оценки степени пространственных расхождений параметров одних и тех же землетрясений при разных скоростных моделях. Такие карты для двух участков, выбранных на исследуемой территории, представлены на рис. 8. Один из участков находится за пределами территории сети $KNET$, в центральной части Таласо-Ферганского разлома (рис. 8, a); другой выбран внутри сети и охватывает центральную часть Киргизского хребта (рис. 8, b).

За периметром сети $KNET$ наблюдаются частые и значительные пространственные расхождения в положении эпицентров одних и тех же событий для разных моделей (рис. 8, a); внутри сети $KNET$ расхождения минимальны и не столь часты (рис. 8, b).

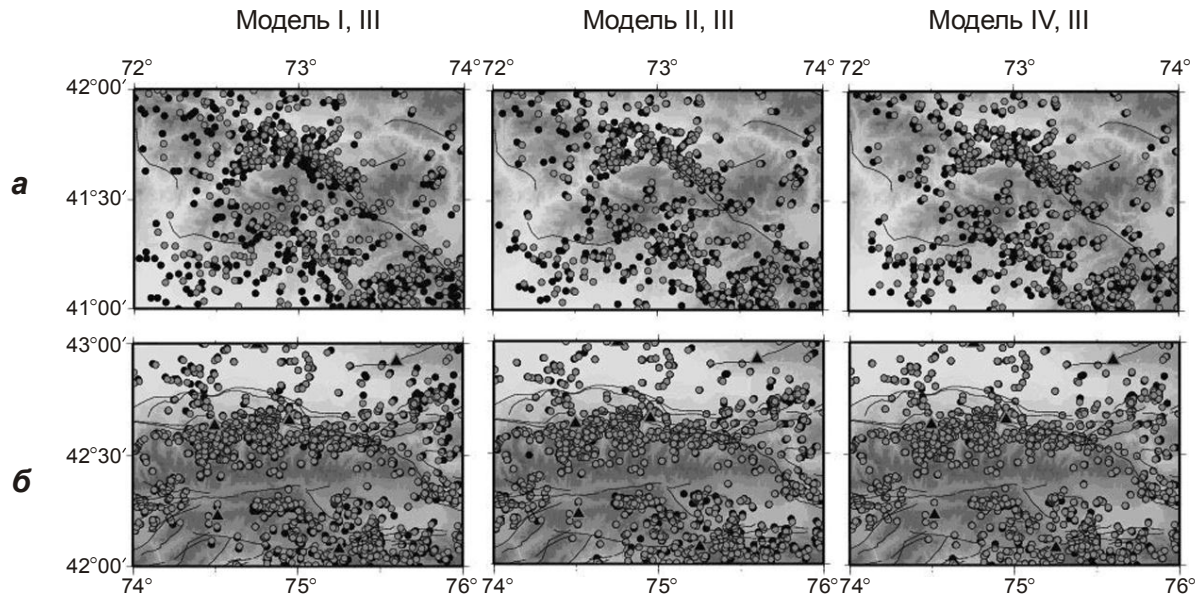


Рис. 8. Распределение сейсмических событий на двух участках, расположенных за пределами сети *KNET* (*a*) и внутри нее (*б*). Черные точки – события, рассчитанные по моделям I, II, IV; серые – по модели III; черные треугольники – станции сети *KNET*

Количественная оценка расхождений координат, рассчитанных по моделям I, II и IV, с координатами, определенными по модели III, представлена в табл. 4. За пределами сети *KNET* средние значения расхождений в координатах выше, чем внутри сети. Минимальные расхождения координат внутри сети отмечаются для моделей III и I, а за пределами *KNET* – для моделей III и IV.

Таблица 4. Средние расхождения координат одних и тех же сейсмических событий, вычисленных для разных моделей внутри сети *KNET* (локальная выборка) и за ее пределами (региональная выборка)

Модели	Средние отклонения координат, град.					
	Региональная выборка			Локальная выборка		
	<i>N</i>	Широта	Долгота	<i>N</i>	Широта	Долгота
I–III	417	0.0397	0.0945	1123	0.0056	0.0074
II–III	442	0.0149	0.0371	1140	0.0052	0.0105
IV–III	434	0.0155	0.0245	1150	0.0044	0.0096

Рассмотрим особенности распределения событий по глубине для разных моделей, используя их интегральные проекции на вертикальную плоскость, ориентированную в направлении север–юг (рис. 9, *a*) и запад–восток (рис. 9, *б*). Почти на всех вертикальных проекциях прослеживаются узкие горизонтальные зоны концентрации событий, глубины которых для каждой модели совпадают с границами слоев. Так, для модели I зоны концентрации событий расположены на глубинах 2.3 и 8.5 км; для модели II – на глубине 2.5 км; для модели III – на глубинах 3 и 7 км; для модели IV – на глубине 5 и 10 км. Представленные проекции отличаются друг от друга не только расположением и плотностью событий в отдельных узких зонах, но и конфигурацией общей области всех событий. Для модели I и II форма области концентрации событий близка к треугольной, для моделей III и IV – к прямоугольной. Это может свидетельствовать о том, что при использовании моделей I и II глубины для событий, находящихся за пределами территории *KNET*, определяются с систематическим занижением, а для моделей III и IV определение глубин более адекватно в региональном масштабе, так как в этом случае наблюдается более равномерное распределение событий в вертикальных плоскостях.

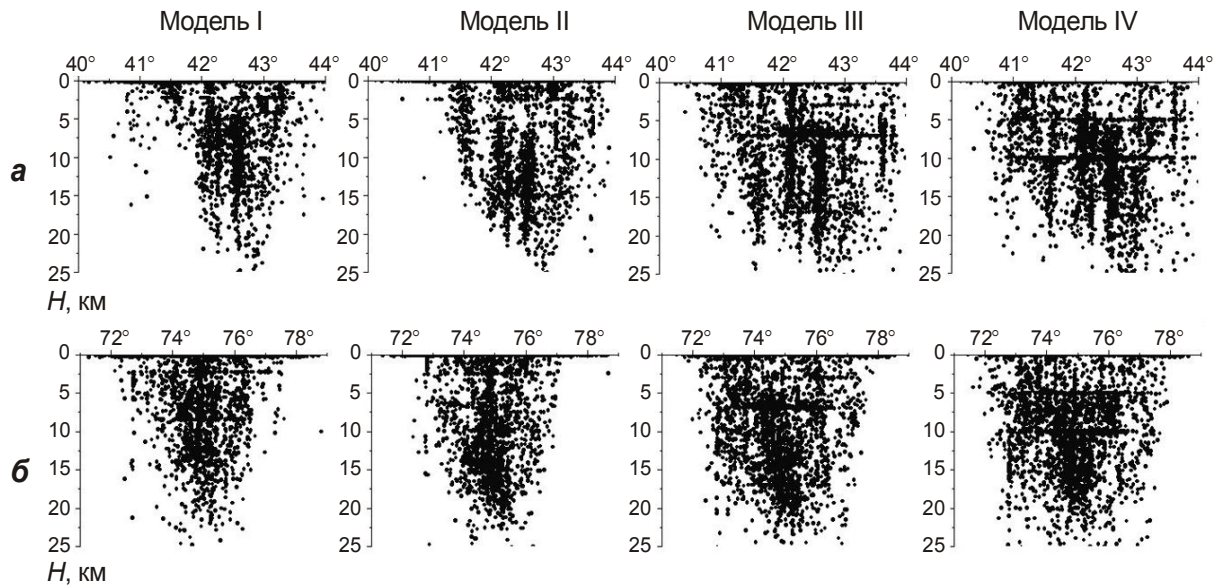


Рис. 9. Интегральные проекции сейсмических событий на вертикальную плоскость, ориентированную в направлении север–юг (а) и запад–восток (б) для моделей I–IV

Анализ гистограмм распределения сейсмических событий по глубине для каждой рассматриваемой модели (рис. 10) показал, что для моделей I и II значительная часть землетрясений находится на глубине 0–5 км. Для моделей III и IV подобный ярко выраженный максимум отсутствует – события почти равномерно распределены в интервале глубин 0–15 км.

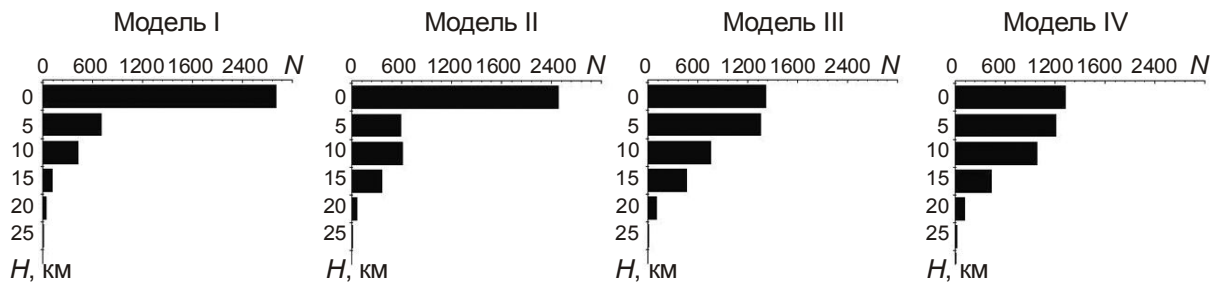


Рис. 10. Распределения сейсмических событий по глубине, рассчитанные для моделей I–IV

Все рассмотренные характеристики позволяют в той или иной мере дать специфическую оценку анализируемым скоростным моделям литосферы Тянь-Шаня. Однако эти оценки представлены в различных размерностях (от номинальной шкалы до шкалы отношений), что весьма затрудняет процесс обобщений по сравнительному анализу моделей. Поэтому предлагается все вышеприведенные оценки представить в четырехбалльной экспертной системе порядковой шкалы. Например, модель IV с самыми лучшими показателями по временным невязкам *RMS* занимает первое место и получает балл 1; на последнем (четвертом) месте оказывается модель I с баллом 4. В соответствии с логикой таких оценок, модель с наименьшей суммой баллов по всем приведенным параметрам может считаться наиболее оптимальной для формирования каталога сейсмических событий в пределах исследуемых территорий Тянь-Шаня (табл. 5).

В результате проведенного анализа установлено, что координаты одного и того же сейсмического события, рассчитанные по разным скоростным моделям, могут отличаться на 10 километров. Минимизировать влияние моделей на расчет гипоцентров позволяет метод двойных разностей.

Таблица 5. Экспертное распределение баллов порядкового приоритета по исследуемым скоростным моделям литосферы Тянь-Шаня в зависимости от проанализированных параметров

Параметры	Региональная выборка				Локальная выборка			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
<i>RMS</i> (табл. 2.)	4	3	2	1	2	1	3	1
<i>ERH</i> (табл. 2)	4	3	2	1	3	2	4	1
<i>ERZ</i> (табл. 2)	2	1	3	4	2	1	3	4
$0.2 \leq RMS \leq 0.6$ (табл. 3)	3	4	2	1				
Глубина (рис. 9, 10)	3	2	1	1				
Сумма баллов	16	13	10	8	7	4	10	6

Метод двойных разностей

Как известно, скоростная модель литосферы позволяет оценить время прохождения сейсмическим лучом расстояния от источника до регистрирующей станции. В реальности же структура Земли намного сложнее, чем любая из описывающих ее скоростных моделей. Поэтому в расчетном времени пробега волны от события к сейсмической станции появляются ошибки, связанные с отклонением скоростной модели от реального строения среды и ее свойств. Для сглаживания подобного рода несоответствий и корректировки гипоцентров используется метод двойных разностей (МДР), идея и технология которого подробно изложена в работах [Waldhauser, Ellsworth, 2000, 2002].

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 с одинаковыми скоростями практически один и тот же путь до регистрирующей станции. В таком случае логично ожидать минимальную разницу во времени прохода волн от пары этих событий к сейсмической станции:

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} = t_k^{i,obs} - t_k^{i,cal} - (t_k^{j,obs} - t_k^{j,cal}), \quad (1.1)$$

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

$$r_k^i = t_k^{i,obs} - t_k^{i,cal} = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i, \quad (1.2)$$

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

С учетом (1.2) выражение (1.1) можно переписать в виде:

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j. \quad (1.3)$$

Таким образом, на основе (1.3) может быть построена система линейных уравнений для всех пар близкорасположенных сейсмических событий по отношению к каждой регистрирующей станции, после чего вычисляются параметры Δx , Δy , Δz и $\Delta \tau$ путем минимизации величины dr_k^{ij} .

Ф. Валдхаузер реализовал вышеописанный алгоритм для корректировки параметров гипоцентров землетрясений в виде программного обеспечения *hypoDD* [Waldhauser, 2001], доступного на сайте <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of01-113/>. Успешные опыты применения данной программы для различных каталогов землетря-

сений представлены в работах [Yang et al., 2001; Prejean et al., 2002; Еманов, Лескова, 2004].

Исходные данные сети KNET. За 1994–2008 гг. на территории, контролируемой сетью KNET, сотрудниками ИС РАН зарегистрировано и обработано порядка 6000 сейсмических событий (рис. 11).

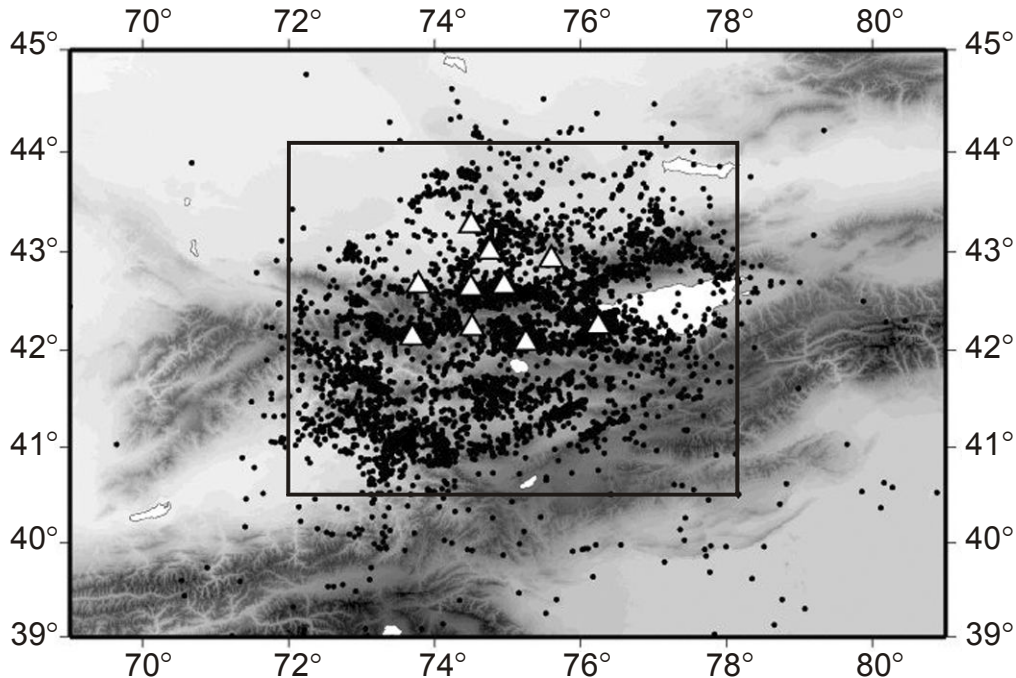


Рис. 11. Распределение сейсмических событий (6270) на территории Тянь-Шаня по данным сети KNET за 1994–2008 гг. Треугольники – станции сети, внутренний прямоугольник – зона локальных сейсмических событий (4980)

Десять сейсмостанций, расположенных в северной части Центрального Тянь-Шаня, позволяют регистрировать события далеко за пределами периметра сети. Основное количество (4980) сейсмических событий за 1994–2008 гг., соответствующих необходимой для анализа плотности распределения, сосредоточено на площади порядка 600×350 км между 40.5° и 44.0° с.ш. и 72° и 78° в.д. (см. рис. 11). Однако в обработке участвовало только 4514 событий, так как данные 1995 г. были исключены из-за отсутствия информации о приходе на станции *P*- и *S*-волн. В сумме было обработано 103526 фаз *P*-волн и 81345 фаз *S*-волн, зарегистрированных станциями сети KNET. В качестве исходных данных для переопределения положения событий использовался сейсмический каталог землетрясений, полученный на основе шестислойной скоростной модели литосферы С. Реккера [Roecker et al., 1993] и расчетов программы HYPOCENTER [Barry et al., 1986].

Особенности применения программы hypoDD к данным сети KNET. Одно из основных понятий алгоритма двойных разностей – “кластер”, который должен включать в себя не менее 8 сейсмических событий, отстоящих друг от друга не более чем на 8 км. При выполнении программы позиции событий, не вошедших ни в один из пространственно связанных кластеров, корректировке не подлежат. При обработке данных сети KNET были сформированы 178 кластеров, в которые вошли в общей сложности 3499 событий, что составляет $\sim 78\%$ от общего числа исследуемых землетрясений (4514). Следует отметить, что программа 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, расположенных выше земной поверхности.

Показателями качества определения параметров сейсмического события в каталогах являются три характеристики – среднеквадратичная ошибка определения времени прихода P - и S -волн на станции RMS , ошибка по горизонтали ERH , ошибка по вертикали ERZ , по изменениям которых можно судить и о качестве корректировки положения гипоцентров в результате работы программы *hypoDD*.

Схема расположения восьми кластеров, включающих максимальное количество событий (от 694 до 110), представлено на рис. 12. Суммарное число событий в кластерах составляет 2720 из 3499 (табл. 6). Из данных таблицы следует, что в процессе работы *hypoDD* в первоначально выделенных кластерах может быть отбраковано более 100 сейсмических событий (см., например, кластер 5), но при этом для оставшихся событий как минимум в два и более раз повышается средняя точность по параметру RMS .

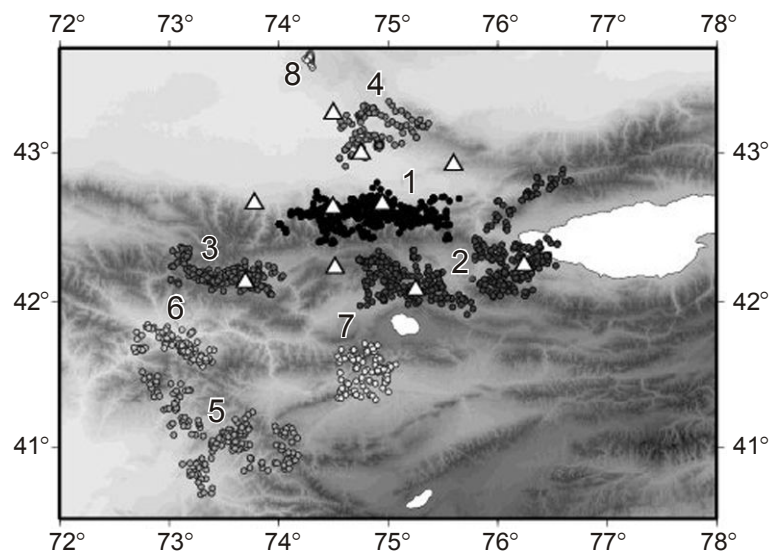


Рис. 12. Положение восьми кластеров с максимальным количеством сейсмических событий на исследуемой территории

Таблица 6. Сравнение некоторых параметров сейсмических событий в кластерах с их максимальным количеством до и после применения процедуры метода двойной разности

Номер кластера	Количество событий		Средние координаты кластера			Среднее значение RMS , с		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	12.368	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

Среди настроечных параметров программы *hypoDD* следует обратить внимание на возможность установки количества циклических итераций обработки данных и на группу характеристик, регулирующих процесс кластеризации. Что касается проблемы выбора рабочих параметров кластеризации, то следует придерживаться значений, рекоменду-

мых в [Waldhauser, 2001], так как ужесточение этих параметров может незначительно улучшить качество передислокации гипоцентров, но при этом существенно сократить (в нашем случае более чем в 2 раза) количество скорректированных событий на выходе.

Число итераций работы программы *hypoDD* было выбрано нами эмпирически. Для всех численно крупных кластеров уже на седьмой-восьмой итерации достигаются сравнительно стабильные и низкие значения *RMS*, которые при последующих циклах меняются незначительно (рис. 13). В связи со сказанным работу программы *hypoDD* имеет смысл ограничивать 10 итерациями.

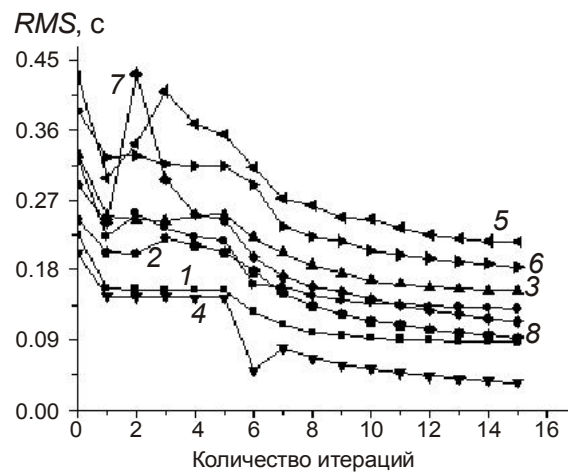


Рис. 13. Изменения *RMS* как функции итерационного процесса для восьми кластеров, включающих максимальное количество событий

Обсуждение результатов

В результате применения программы *hypoDD* при обработке 4514 сейсмических событий сети *KNET* был получен новый каталог, включающий 3499 землетрясений, параметры которых претерпели изменения. Уровень и размах пространственной корректировки этих событий отражен в табл. 7.

Таблица 7. Сравнительные характеристики гипоцентров до и после применения программы *hypoDD* к данным сети *KNET*

Параметр	Значение до применения программы <i>hypoDD</i>		Значение после применения программы <i>hypoDD</i>		Значение смещения	
	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	Среднее	<i>max</i>
Широта	40°.420	44°.181	40°.423	44°.181	0°.010 (~1.110 км)	0°.093 (~10.34 км)
Долгота	71°.856	78°.420	71°.853	78°.426	0°.013 (~1.100 км)	0°.143 (~11.69 км)
Глубина (км)	0	28.84	0.04	44.97	5.10	39.9

Таким образом, если в плане события поменяли свое положение сравнительно одинаково по широте и долоте в среднем на 1.1 км, то по глубине гипоцентры скорректированы примерно на 5 км. Некоторые особенности корректировки эпицентров исследуемых событий отражены на рис. 14. Смещения землетрясений в плане менее заметны для зоны 2, находящейся внутри периметра станций *KNET*, и более существенны в удаленных от сети краевых зонах 1 и 3. При этом в целом происходит формирование более узких сейсмогенерирующих зон.

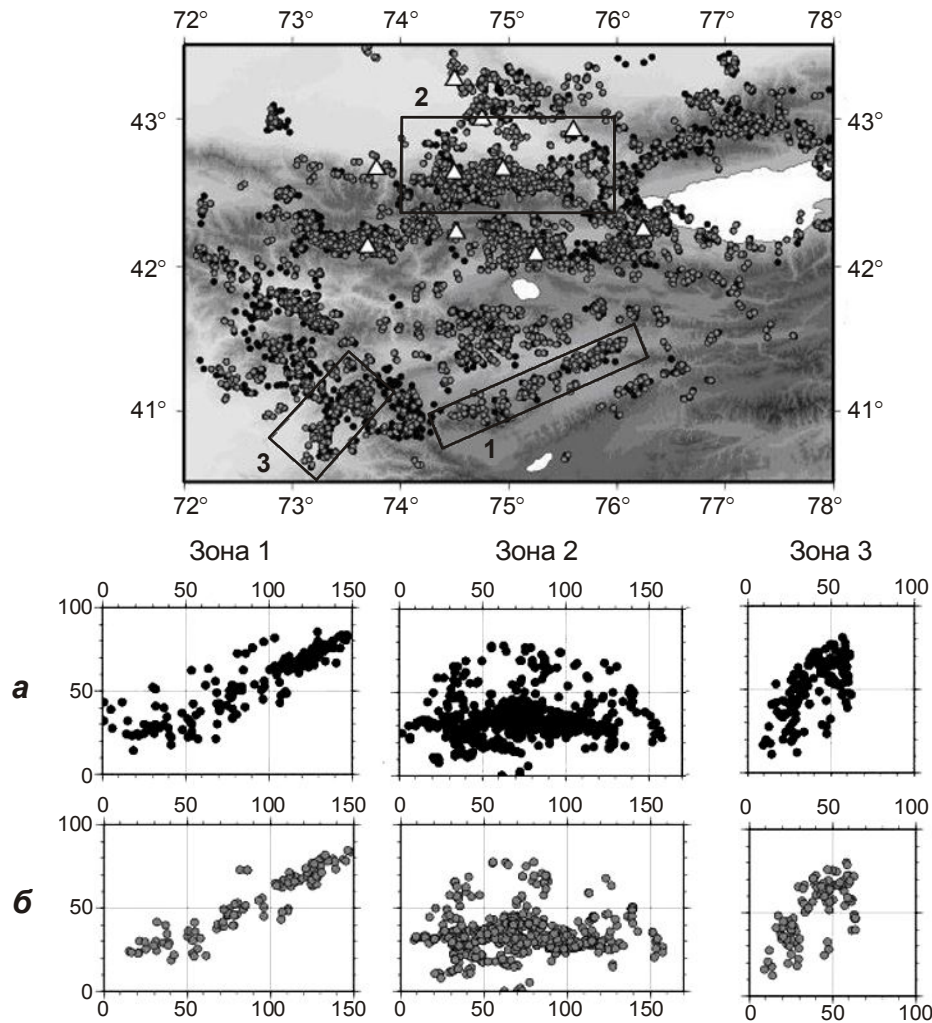


Рис. 14. Вверху: совмещенное положение 3499 сейсмических событий до (черные точки) и после (серые точки) применения метода двойных разностей. Внизу: раздельное положение эпицентров для выделенных на карте зон 1, 2, 3 до (а) и после (б) применения программы *hupoDD*

Рассмотрим усредненные значения ошибок расчета параметров землетрясений RMS , ERX , ERY , ERZ до и после применения программы *hupoDD* (табл. 8). Можно видеть, что после применения программы исследуемые ошибки уменьшились в 1.5–2 раза.

Таблица 8. Средние значения ошибок до и после применения программы *hupoDD*

Этапы исследования	N	RMS , с	ERX , км	ERY , км	ERZ , км
До применения программы	3499	0.313	1.817	1.817	3.810
После применения программы	3499	0.144	1.303	1.335	1.771

Рассматривая более подробно некоторые из представленных в табл. 8 параметров, отметим, что до применения метода двойных разностей значения RMS практически для всех событий лежали в интервале 0.1–1.0 с; после применения программы *hupoDD* значения RMS более чем половины событий оказались в интервале 0.01–0.1 с (рис. 15). Средняя ошибка по глубине ERZ уменьшилась после применения программы *hupoDD* более чем в два раза (см. табл. 8). Одновременно значительная часть событий, сосредоточенных ранее на глубинах до 5 км, сместилась на глубину 10 км (рис. 16).

Весьма существенные структурные изменения наблюдаются в распределении сейсмических событий в вертикальных плоскостях (рис. 17).

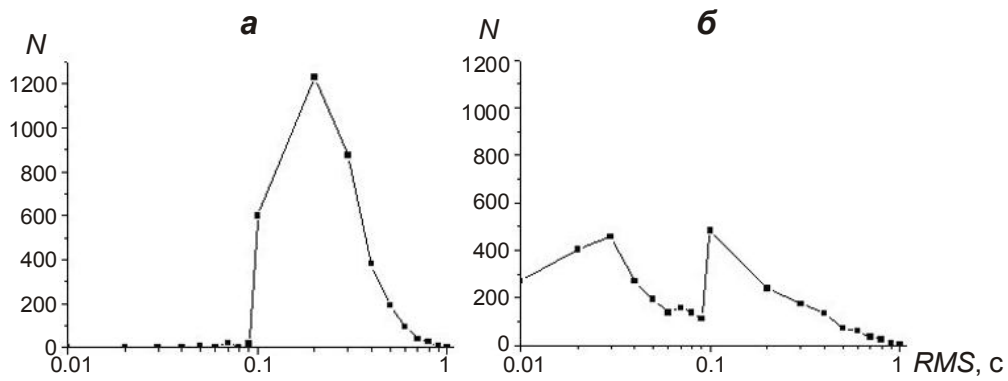


Рис. 15. Распределение количества событий до (а) и после (б) применения программы *hypoDD* в зависимости от значения *RMS*. По горизонтальной оси логарифмический масштаб

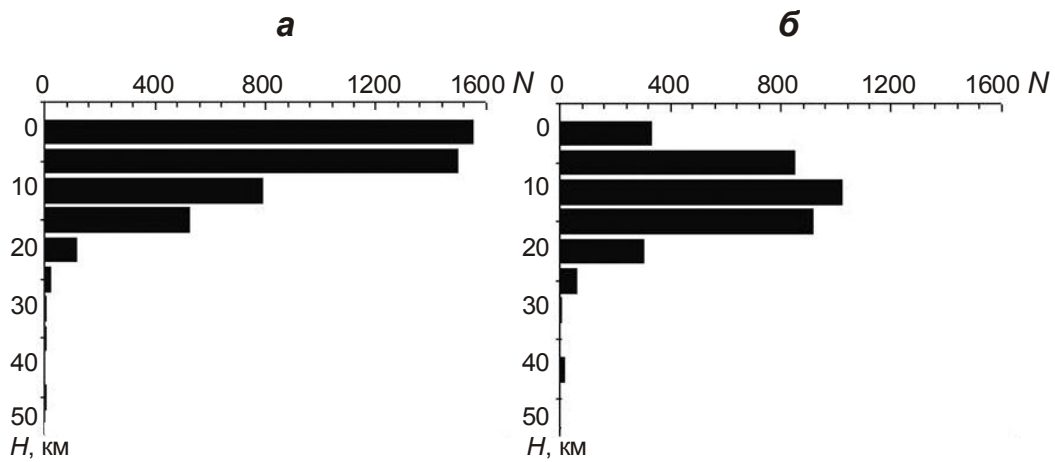


Рис. 16. Распределение землетрясений по глубине до (а) и после (б) применения программы *hypoDD*

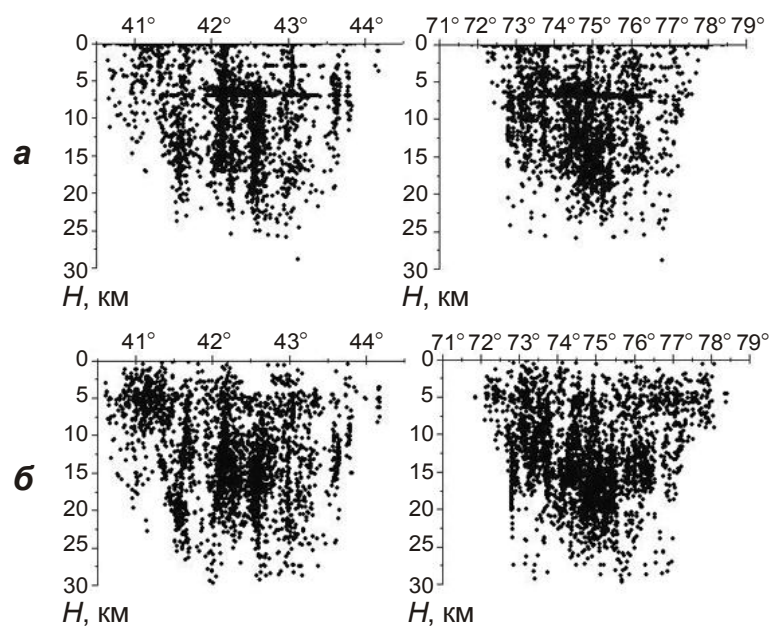


Рис. 17. Интегральные проекции сейсмических событий на вертикальную плоскость, ориентированную в направлении юг–север и запад–восток, до (а) и после (б) применения программы *hypoDD*

До применения программы *hypoDD* (рис. 17, а) прослеживаются узкие строго горизонтальные зоны концентрации событий на глубинах около трех и семи километров, которые, скорее всего, связаны с неточностями скоростной модели литосферы. Применение программы убирает эти горизонтальные зоны, но более четко проявляются субвертикальные зоны концентрации сейсмических событий (рис. 17, б).

Метод двойных разностей и скоростные модели литосферы

Выше отмечалось, что метод двойных разностей мало зависит от используемой скоростной модели. Для проверки степени зависимости метода от модели при работе с программой *hypoDD* вместо параметров модели С. Реккера (модель III) были использованы параметры модели Института динамики геосфер РАН (модель IV).

В результате, при тех же параметрах обработки число событий с 3499 уменьшилось до 3306; пространственное положение оставшихся событий при этом почти не изменилось (рис. 18). Усредненные значения ошибок RMS , ERX , ERY , ERZ для сейсмических событий после применения программы *hypoDD* для двух этих моделей приведены ниже в табл. 9.

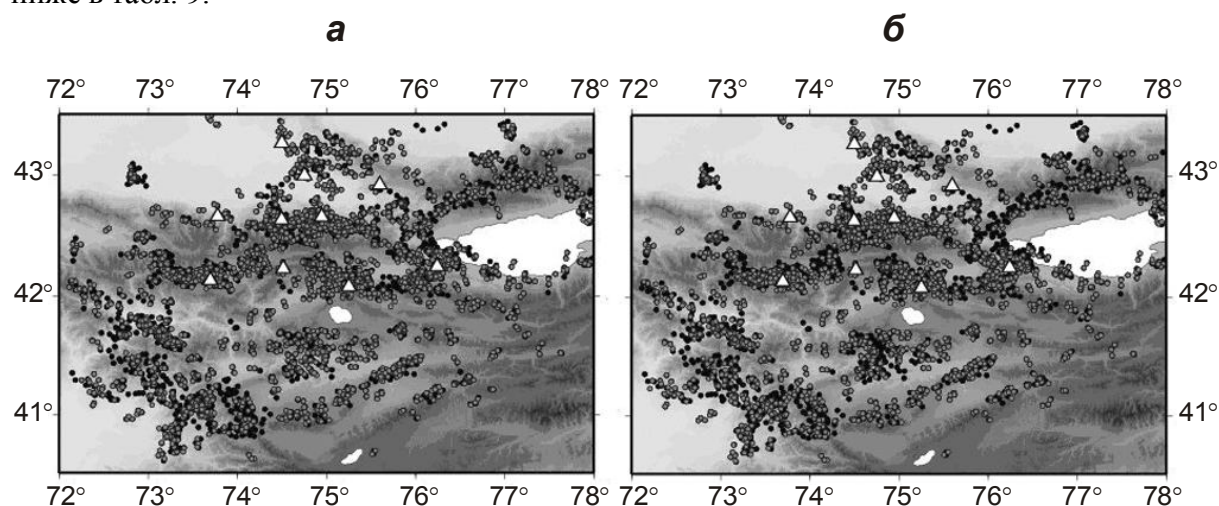


Рис. 18. Положения эпицентров до (черные кружки) и после (серые точки) применения программы *hypoDD* для моделей III (а) и IV (б)

Таблица 9. Средние значения ошибок определения параметров сейсмических событий после применения программы *hypoDD* для моделей III и IV

	N	RMS , с	ERX , км	ERY , км	ERZ , км
Модель III	3499	0.144	1.303	1.335	1.771
Модель IV	3306	0.152	1.331	1.474	1.771

Как можно видеть, все ошибки для обеих моделей различаются весьма незначительно; естественно, что для модели III основные ошибки меньше.

Заключение

В работе проанализированы четыре наиболее известные скоростные модели литосферы Центрального Тянь-Шаня. Полученные результаты позволяют отметить следующие моменты.

Для локальных событий наилучшие результаты получены при использовании модели II, а для региональных в целом близкие результаты получены для моделей III и IV.

Модель II отличается от остальных своей детальностью (см. табл. 1). Она была предложена Т.П. Грином для определения параметров землетрясений внутри сети *KNET*, чем и объясняются лучшие по сравнению с другими моделями результаты для локальной территории (см. табл. 5). Однако сеть *KNET* способна фиксировать события, происходящие далеко за ее пределами, в связи с чем на первые позиции поднимаются модели III и IV. Следует заметить, что по модели IV несколько хуже определяется вертикальная компонента для землетрясений в восточной части рассматриваемой территории (см. рис. 3). Из сказанного следует вывод, что для расчета параметров землетрясений предпочтительнее использование модели III.

В результате применения метода двойных разностей (программа *hypoDD*) к 4514 сейсмическим событиям из каталога, составленного по данным сети *KNET* за 1994–2008 гг., было уточнено положение гипоцентров 3499 из них (~78% от исходного объема данных). Среднее изменение положения гипоцентров по долготе и широте составило 1.1 км, по глубине – 5.1 км. Ошибки определения параметров землетрясений *RMS*, *ERH*, *ERZ* в среднем уменьшились в 1.5–2 раза. При этом если до корректировки гипоцентры преобладающего числа событий располагались на глубине до 5 км, после выполнения процедур метода двойных разностей они сместились на глубину 10 км.

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

Благодарности

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, государственным контрактом № 02.740.11.0730 Министерства образования и науки РФ.

Литература

- Грин Т.П. Зависимость скорости на годографе от глубины землетрясений в пределах Северного Тянь-Шаня. //Строение литосферы Тянь-Шаня. Бишкек: Илим, 1990. С.40–54.
- Еманов А.А., Лескова Е.В. Структура афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Вестник НЯЦ РК. 2004. Вып. 2(18). С.184–189.
- Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / Под ред. А.Б. Бакирова. Бишкек: Илим, 2006. 116 с.
- Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадиева В.А. Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети *KNET*) // Физика Земли. 2005. № 11. С.62–78.
- Barry R.L., Berg E., Frazer L.N. Hypocenter: An Earthquake Location Method Using Centered, Scaled, and Adaptively Damped Least Squares // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1986. V. 76, N 3. June. P.771–783.
- Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L. Three-Dimensional Elastic Wave Velocity Structure of the Western and Central Tien-Shan // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, N B9. P.15779–15795.
- Prejean S., Ellsworth W.L., Zoback M., Waldhauser F. Fault structure and kinematics of the Long Valley Caldera region, California, revealed by high-accuracy earthquake hypocenters and focal mechanism stress inversion // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N B12, 2355. Doi: 10.1029/2001JB001168.

- Waldhauser F. HypoDD: A computer program to compute double-difference hypocenter locations // U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 2001. P.01–113.
- Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Hayward Fault, California // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2000. V. 90. P.1353–1368.
- Waldhauser F., Ellsworth W.L. Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N B3, 10.29/2000JB000084.
- Yang Z.X., Waldhauser F., Chen Y.T., Richards P.G. Double-difference relocation of earthquakes in central-western China, 1992–1999 // J. Seismol. 2005. V. 9. P.241–264.

Сведения об авторах

СЫЧЕВА Найля Абдулловна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научная станция РАН в г. Бишкеке. 720049, Киргизия, г. Бишкек-49, Научная станция РАН. E-mail: nelya@gdirc.ru

КУЗИКОВ Сергей Иванович – кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, Научная станция РАН в г. Бишкеке. 720049, Киргизия, г. Бишкек-49, Научная станция РАН. E-mail: ksi@gdirc.ru

**ANALYSIS OF VELOCITY MODEL
FOR THE TIEN-SHAN LITHOSPHERE
AND THE DOUBLE-DIFFERENCE METHOD
FOR HYPOCENTERS LOCATION
USING SEISMIC NETWORK KNET DATA**

N.A. Sycheva, S.I. Kuzikov

Research station of RAS in Bishkek city, Kyrgyzstan

Abstract. The comparative analysis of four most known lithospheric velocity models for territory of Central Tien Shan is carried out. For accuracy of calculation of the hypocenters on study region the most preferable are Steve Roecker's model and model of Institute of dynamics of geospheres of the RAS. However the model of T.P. Grin describes a crust velocity structure within perimeter of seismological stations of KNET more adequately and allows receiving the hypocenters of local events with the minimum values of errors. The catalogue for more than 4500 seismological events according to network KNET for 1994–2008 with the relocated hypocenters by the double-difference algorithm was calculated; also the catalogue with the corrected hypocenters for ~3500 events is received. Average relocation of the hypocenters on a longitude and latitude are ~1.1 km, on depth are 5.1 km, thus errors of calculation of parameters of earthquakes have on the average decreased in 1.5–2 time.

Keywords: earthquake, hypocenter, velocity model of the lithosphere, Double-difference method.