

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЛИТОСФЕРЫ  
НА РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ СЕТИ  
КNET ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ**

***Н.А. Сычева, Д.А. Баскевич***

---

На основе сейсмических бюллетеней рассчитаны параметры землетрясений, которые произошли на территории Центрального Тянь-Шаня за 2000–2008 гг. для четырех скоростных моделей литосферы. Проведен сравнительный анализ моделей. Установлено, что лучшими для использования при расчете параметров гипоцентров являются модели Стива Реккера и Института динамики геосфер РАН.

*Ключевые слова:* литосфера; сейсмическое событие; сеть KNET.

При сейсмологических исследованиях, связанных с вычислением различных статистических характеристик, для территории Центрального Тянь-Шаня, на Научной станции РАН используется каталог землетрясений, полученный по данным сети KNET, расчет которого осуществляется программой *Nupocenter* [1] с применением шестислойной модели литосферы Стива Реккера [2, 3]. Как известно, наибольшие ошибки при расчете параметров гипоцентров связаны с неточностью используемой скоростной модели. Именно благодаря скоростной модели вычисляется время пробега волн и расстояние от очага до сейсмической станции. Получение точных абсолютных значений параметров гипоцентров

возможно при использовании скоростной модели Земли, которая наиболее точно описывает реальную среду. Для территории Тянь-Шаня существует несколько скоростных моделей литосферы (СМЛ), и целью данной работы является анализ известных скоростных моделей и выбор лучшей из них для расчета абсолютных параметров гипоцентров.

***Скоростные модели литосферы Земли для территории Тянь-Шаня.*** Из существующих скоростных моделей литосферы Тянь-Шаня для сравнительного анализа были выбраны четыре наиболее известных, на наш взгляд, варианта: I – Института сейсмологии НАН Кыргызстана, II – Т.П. Грина [4], III – Стива Реккера [2, 3], IV

Таблица 1

Параметры исследуемых СМЛ Тянь-Шаня

№ вар-та	Параметр	Значение глубины и скорости											
		Институт сейсмологии НАН КР (Кыргызстан)											
I	Гр. верх. слоя, км	0	2,3	8,5	15	30	50						
	Vp, км/с	5,00	5,9	6,2	6,5	7,0	8,0						
	Vs, км/с	2,97	3,45	3,60	3,78	4,07	4,65						
II Т.П. Грин (Кыргызстан)													
II	Гр. верх. слоя, км	0	2,5	5	7,5	10	15	18	24	30	40	50	
	Vp, км/с	5,2	5,69	5,82	5,91	6,00	6,19	6,34	6,60	6,9	7,4	7,9	
	Vs, км/с	3,05	3,32	3,39	3,44	3,48	3,59	3,68	3,82	3,95	4,27	4,56	
III С. Реккер (США)													
III	Гр. верх. слоя, км	0	3	7	17	27	38	50					
	Vp, км/с	5,00	5,80	6,05	6,20	6,40	6,85	8,05					
	Vs, км/с	2,85	3,35	3,50	3,60	3,71	3,92	4,55					
IV Институт динамики геосфер РАН(Россия)													
IV	Гр. верх. слоя, км	0	5	10	20	35	50	75					
	Vp, км/с	5,02	5,89	6,18	6,33	6,41	7,97	8,19					
	Vs, км/с	2,90	3,40	3,57	3,66	3,70	4,43	4,55					

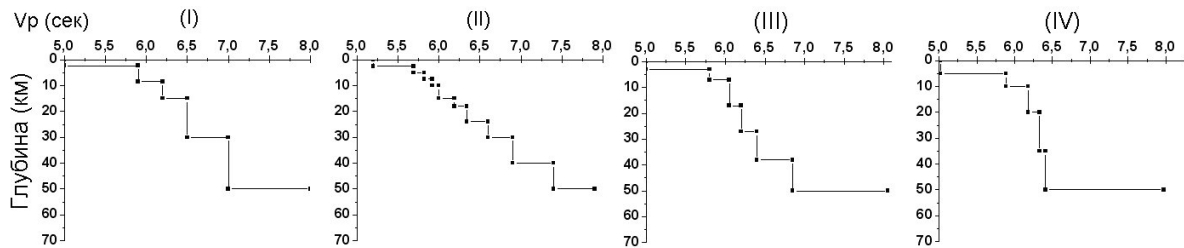


Рис.1. Графики скорости распространения P-волны по глубине для исследуемых моделей.

Таблица 2

Средние значения RMS, ERH и ERZ для каталогов, полученных по разным моделям

№ модели	RMS, сек	ERH, км	ERZ, км
I	0,46	3,48	4,21
II	0,48	3,66	4,65
III	0,36	2,17	4,31
IV	0,33	2,00	6,00

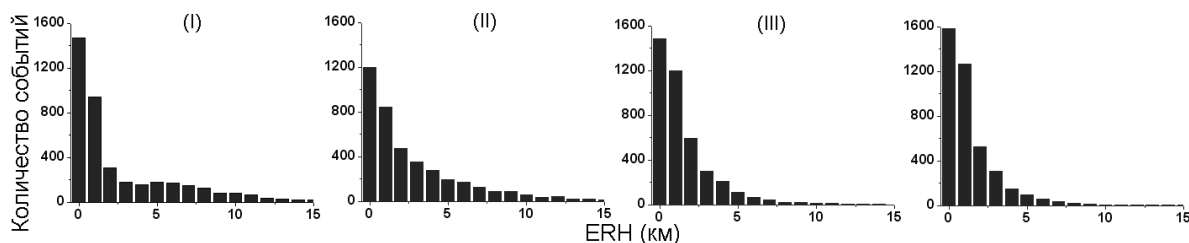


Рис. 3. Гистограммы распределения количества событий в зависимости от ERH для землетрясений, рассчитанных по разным моделям

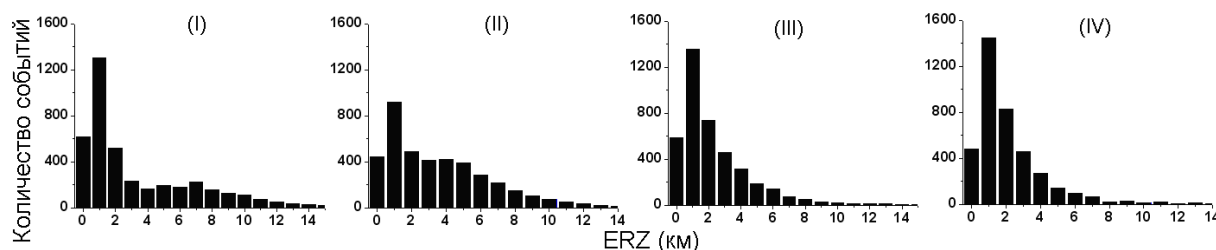


Рис. 4. Гистограммы распределения количества событий в зависимости от ERZ для землетрясений, рассчитанных по разным моделям.

– Института динамики геосфер РАН [5]. По сути каждая из данных СМЛ представляет собой вариант послойно-горизонтального строения литосферы со значениями скоростей прохождения сейсмических волн в каждом слое (табл. 1).

Основное различие приведенных выше СМЛ заключается в количестве горизонтальных слоев, глубинах их границ раздела, значениях скорости прохождения  $P$ - и  $S$ -волн в каждом слое. Для более удобного восприятия содержания этих СМЛ и их различий на рис.1 приводятся графики вариантов скорости распространения  $P$ -волны по глубине.

**Анализ каталогов, рассчитанных для разных скоростных моделей литосферы.** Сравнительный анализ рассматриваемых СМЛ проводился на основе соответствующих им 4-х каталогов, полученных программой Нуросcenter [1] при обработке 4095 бюллетеней сейсмических событий, произошедших за 2000–2008 гг. на территории  $40^{\circ}$ – $44^{\circ}$  с.ш. и  $72^{\circ}$ – $78^{\circ}$  в.д. Каталоги содержат координаты эпицентра, глубину и энергетический класс по каждому сейсмическому событию, а также значения RMS (Root Mean Square – среднеквадратичная ошибка определения времени прихода  $P$ - и  $S$ -волн на станции), ERH (horizontal error – ошибка по горизонтали) и ERZ (vertical error – ошибка по вертикали). Средние значения параметров RMS, ERH и ERZ

позволяют в первом приближении оценить качество информации, содержащейся в каждом из каталогов (табл. 2).

Исходя из значений, представленных в таб. 2, минимальные значения по RMS и ERH характерны для модели IV, однако ERZ (ошибка по глубине) для этой модели принимает максимальное значение из всех моделей. Максимальное значение ERZ для модели IV обусловлено несоответствием модели для территории, которая находится в юго-западной части оз. Иссык-Куль, и для которой ошибки могут достигать значения до 100 км. Модель III содержит близкие к модели IV значения RMS и ERH, при этом значения ERZ намного меньше. Модели I и II принимают максимальные и близкие друг другу значения по RMS и ERH. Наименьшие значения по ERZ характерны для модели I. Наиболее полное представление об этих характеристиках для каждой из моделей можно получить, построив гистограммы их распределения. Полученные результаты представлены на рис. 2–4.

На рис. 2 представлены зависимости количества событий от RMS для каталогов, полученных по различным СМЛ. Как видно, максимальное количество событий, имеющих неувязки (RMS) в диапазоне 0,1–0,4 секунды, наблюдается для моделей III и IV, что соответствует погрешности в определении координат гипоцентра

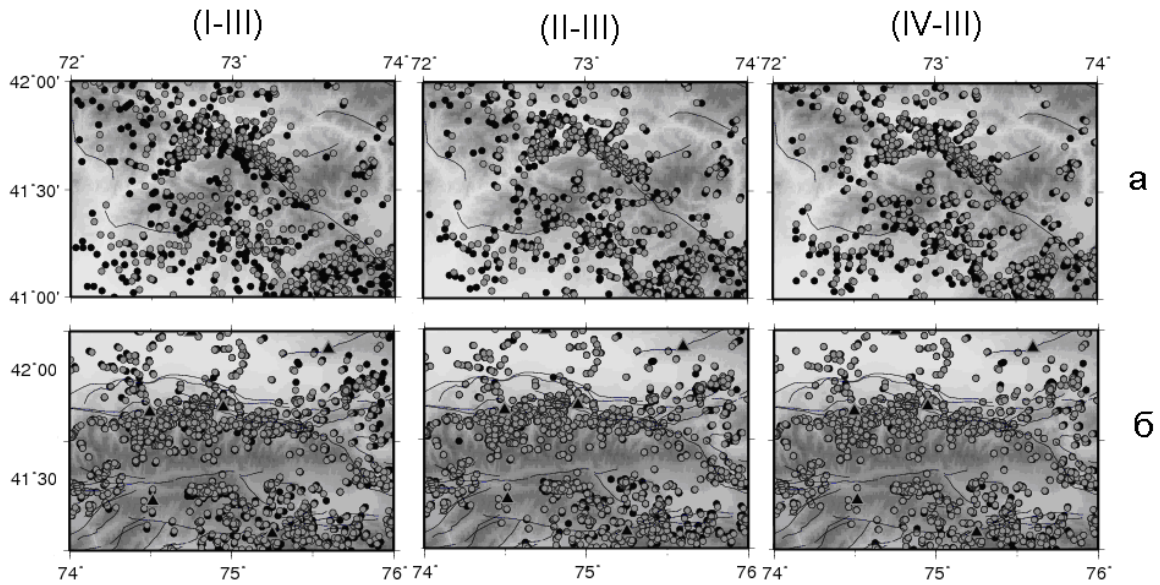


Рис. 5. Карты расположения сейсмических событий в двух зонах, рассчитанных по моделям I, II и IV (черные точки) и по модели III (серые точки).

600–2400 м. Для моделей I и II большая часть событий укладываются в диапазоне 0,1–1, что соответствует ошибке 600–6000 м. Это обстоятельство свидетельствует о том, что модели III и IV точнее описывают реальную среду, чем модели II и I.

На рис. 3 представлены изменения количества землетрясений в зависимости от ERH для рассматриваемых моделей и отмечено, что для модели IV максимальное число событий имеет ошибку по горизонтали в пределах 0–5 км. Чуть хуже характер распределения ERH для модели III. Модели I и II содержат гораздо меньше событий при значении ошибки ERH в пределах 0–5 км.

На рис. 4 представлены изменения количества событий от ERZ для всех рассматриваемых моделей, и большая часть событий имеет минимальные значения ошибки по вертикали для моделей III и IV, хотя по средним значениям эта ошибка минимальна для модели I. Результаты, представленные на рис. 2–4, свидетельствуют о том, что модели III и IV обеспечивают меньшие ошибки по сравнению с моделями I и II, и являются предпочтительными для использования при расчете параметров гипоцентров.

На рис. 5 представлены карты распределения сейсмических событий, рассчитанных по различным моделям для двух зон Центрального Тянь-Шаня. Одна зона находится за пределами станций сети KNET (рис. 5а), другая внутри рас-

положения станций (рис. 5б). Для сравнения на каждой карте представлено расположение сейсмических событий, рассчитанных по двум моделям: по текущей модели (I или II или IV – черные точки) и по модели III (серые точки). Согласно рис.5а в областях за пределами сети наблюдается несовпадение координат землетрясений, рассчитанных различными моделями, причем максимальные несовпадения с моделью III наблюдаются у модели I и минимальные у модели IV. Однако внутри сети KNET (рис. 5б) все модели работают идентично и события, отмеченных черным цветом минимум, что свидетельствует о том, что координаты событий, рассчитанных по моделям I, II и IV, совпадают с координатами событий, рассчитанных по модели III. Это обстоятельство говорит о том, что координаты событий, находящихся внутри территории сети KNET, хорошо определяются всеми рассматриваемыми моделями, однако за пределами этой территории положение землетрясений отличается и максимальные отличия от модели III характерны для событий, рассчитанных по модели I.

На рис. 6 представлены интегральные проекции сейсмических событий на вертикальную плоскость в направлении Север-Юг и Запад-Восток, рассчитанных по различным моделям, где хорошо видны узкие горизонтальные зоны концентрации сейсмических событий, причем для каждой модели глубины

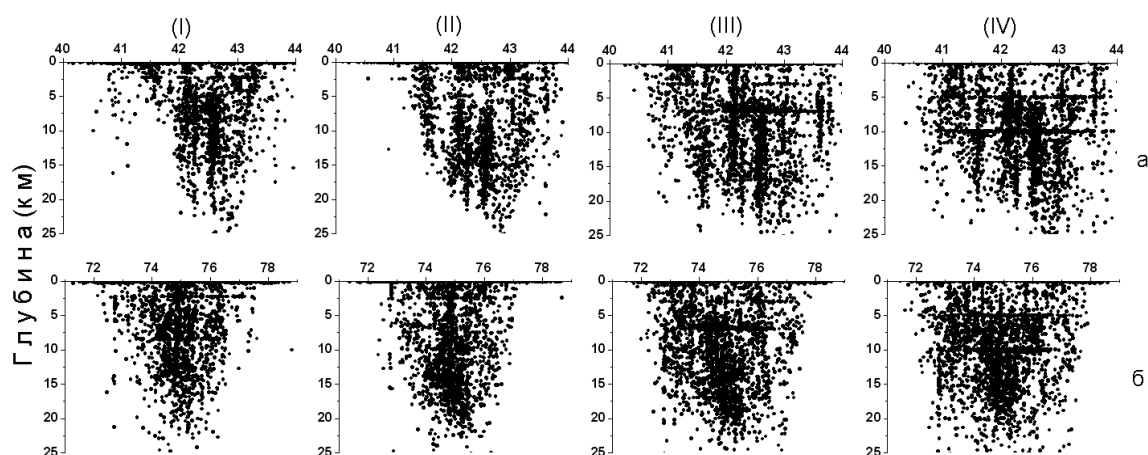


Рис. 6. Интегральные проекции сейсмических событий на вертикальную плоскость в направлении Север-Юг (слева) и Запад-Восток (справа), рассчитанных по различным моделям.

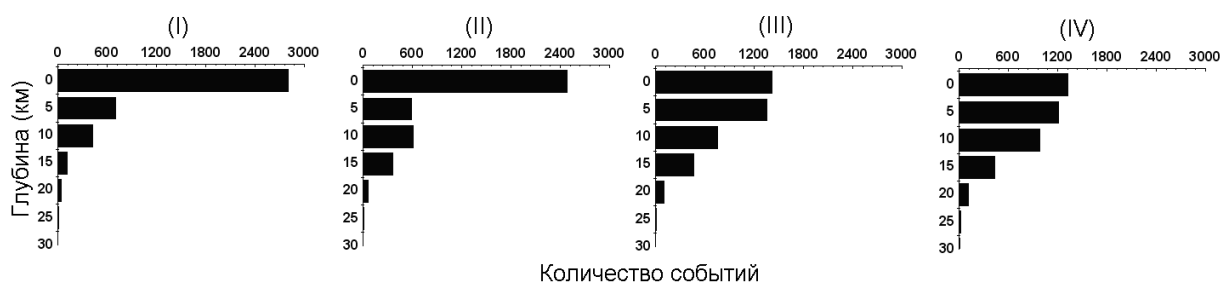


Рис. 7. Гистограммы распределения количества сейсмических событий по глубинам для различных моделей.

Таблица 3

Количество сейсмических событий в зависимости от RMS для всех исследуемых моделей

RMS, сек	0–0,2		0,2–0,6		Более 0,6		
	№ Модели	Кол. соб.	%	Кол. соб.	%	Кол. соб.	%
I		537	13,10	2627	64,09	936	22,835
II		632	15,42	2507	61,16	960	23,420
III		652	15,91	3161	77,12	287	7,001
IV		753	18,37	3164	77,19	181	4,416

расположения этих зон совпадают с границами слоев этих моделей. Так, например, для модели I они расположены на глубинах 2,3, 8,5 км; для модели II – на глубине 2,5 км; для модели III – на глубинах 3 и 7 км и для модели IV – на глубине 5 и 10 км. Представленные проекции отличаются друг от друга и по конфигурации расположения гипоцентров сейсмических событий. Для моделей I и II область концентрации событий имеет треугольную форму, а для моделей III и IV форма концентрации событий

близка к прямоугольной. Это свидетельствует о том, что модели I и II хорошо определяют глубину для событий, находящихся непосредственно на территории внутри сети KNET либо в ее ближайшем окружении. Модели III и IV позволяют хорошо определять положение гипоцентров событий, расположенных на некотором расстоянии от сети.

На рис. 7 представлены гистограммы распределения сейсмических событий по глубине для каждой рассматриваемой модели. Поскольку



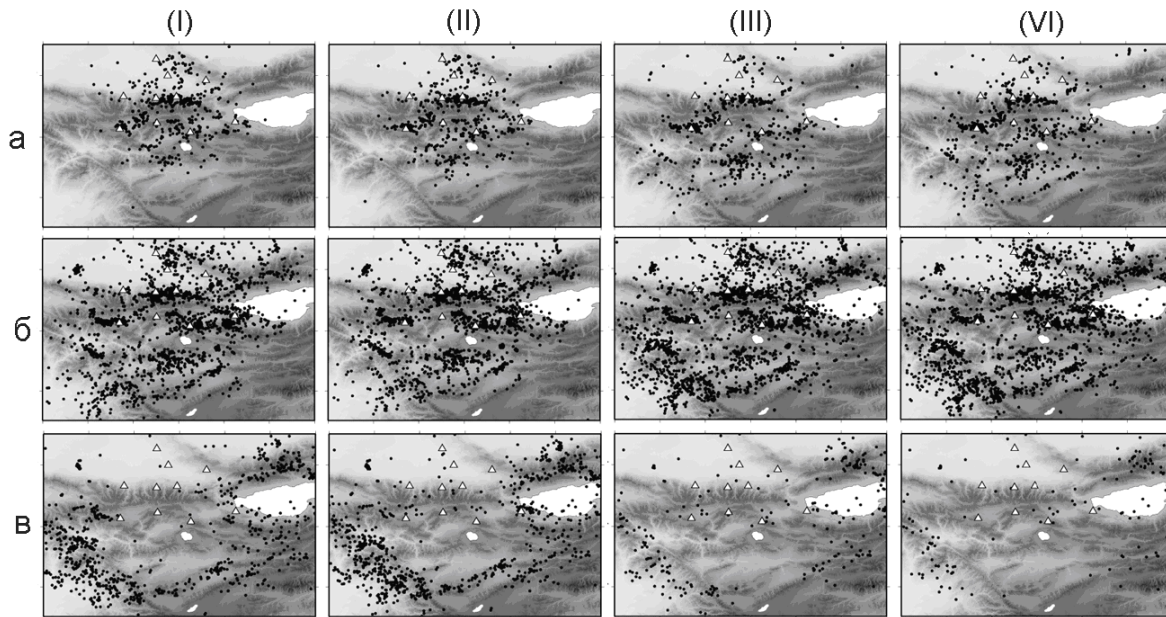


Рис. 8. Расположение сейсмических событий, рассчитанных по разным моделям в зависимости от RMS(сек): а –  $RMS < 0,2$ ; б –  $0,2 < RMS < 0,6$ ; в –  $RMS > 0,6$ .

данные представлены в одном масштабе, из этих распределений отчетливо видно, что для моделей I и II значительная часть сейсмических событий находится на глубине 0–5 км, а для моделей III и IV такой ярко выраженный максимум отсутствует, и события почти равномерно распределены в диапазоне глубин 0–15 км. Такое распределение событий по глубине как для моделей III и IV ближе к существующему мнению, что сейсмичность Тянь-Шаня ограничена глубиной 25 км и сейсмогенерирующим является слой на глубине 10–15 км. Этот результат так же свидетельствует, что предпочтительными являются модели III и IV.

Одной из важных оценок качества расчета параметров землетрясений является RMS (неувязки времени прихода сейсмических волн на станции). Построение гистограмм зависимости количества землетрясений от RMS для различных моделей не позволяет ответить на вопрос, как RMS зависит от географического расположения эпицентров. Для выяснения этого вопроса для землетрясений, полученных по разным скоростным моделям, были сформированы три выборки: события, которые имеют RMS в диапазоне 0–0,2, 0,2–0,6 и более 0,6 с. Количественные характеристики числа событий в зависимости от RMS по каждой выборке и для каждой модели представлены в табл. 3.

Наибольшее количество событий, имеющих малое RMS, характерно для модели IV, наименьшее – для модели I. Число событий по второй выборке по каждой из моделей значительно и составляет 64–77% от общего числа событий. Минимальное количество событий включает в себя третья выборка, и для моделей III и IV количество таких событий составляет 4–7%, а для моделей I и II – 22–23% от общего числа событий. Далее для всех сформированных выборок по каждой модели были построены карты положения этих событий (рис. 8). Эти карты позволяют определить качество работы каждой модели относительно станций сети KNET. В первой выборке (рис. 8а) события по всем моделям в основном сосредоточены внутри и в краевых областях сети. Во второй выборке события расположены уже не только внутри сети, но и далеко за ее пределами, и число таких событий значительно для всех моделей. Положение землетрясений с большим RMS сосредоточены за пределами территории расположения станций сети (рис. 8в), при этом для модели I и II таких событий значительно больше, чем для моделей III и IV. В целом, параметры событий, расположенных внутри сети KNET определяются хорошо всеми анализируемыми моделями. Если же события находятся за пределами территории расположения стан-

ций, то предпочтительной для использования являются модели III и IV, которые дают минимальные показатели по анализируемым параметрам. Поскольку сейсмологическая сеть регистрирует события как внутри сети, так и за ее пределами, то для расчета параметров гипоцентров предпочтительными являются модели III и IV.

В результате выполненной работы проведен анализ четырех скоростных моделей литосферы Земли, предложенных различными авторами для территории Тянь-Шаня. Анализ некоторых характеристик, получаемых при расчете параметров землетрясений, с использованием моделей I, II, III и IV, позволил сделать следующий вывод: наилучшими для использования являются модель III (Стива Реккера), которая была предложена по результатам томографических исследований, и модель IV, полученная в результате научных исследований в Институте динамики геосфер РАН.

Работа выполнена при частичной поддержке пороекта РФФИ 09-05-00687-а и госконтракта по ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”.

#### Литература

1. 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. No.3. June 1986. P.771-783.
2. 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 Tien-Shan // Journal of Geophysical Research. 1993. Vol. 98. № B9. P. 15779–15795.
3. Реккер С. Земная кора и верхняя мантия Киргизского Тянь-Шаня по результатам предварительного анализа Ghengis широкополосных сейсмических данных // Геология и геофизика. 2001. Т.42. № 10. С. 1554–1565.
4. Грин Т.П. Зависимость скорости на годографе от глубины землетрясения в пределах Северного Тянь-Шаня. Бишкек: Илим, 1991. С. 40–53.
5. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / Под ред. А.Б. Бакирова. Бишкек: Илим, 2006. С. 116.
6. Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1983. 246 с.