

УДК 551.42

Омуралиева А.

*Институт сейсмологии НАН КР,  
г. Бишкек, Кыргызстан***ЛОКАЛЬНАЯ СКОРОСТНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО ДАННЫМ ЦИФРОВЫХ СТАНЦИЙ СЕТЕЙ KRNET (ИС НАН КР), KNET (ИС РАН) В ТЕЧЕНИЕ 2020 Г.**

**Аннотация.** Изложены результаты разработки методики изучения локальных скоростных неоднородностей земной коры Тянь-Шаня, представляющая собой вариант детальной сейсмической томографии. Приведены карты-схемы горизонтальных разрезов локальных скоростных неоднородностей земной коры (на глубинах 5-10 км, 10-15 км, 15-20 км, 20-25 км, 25-30 км, 30-35 км) Тянь-Шаня, а также модели локальных неоднородностей по вертикальному разрезу на меридиане землетрясения Кемин (1911 г.,  $K_R=17.8$ ,  $M_{LH}=8.2$ ) по параметрам:  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , коэффициента Пуассона, плотности  $\rho$ , модуля сжатия  $K$ , модуля сдвига или жёсткости  $\mu$ . Отмечено изменение скоростных неоднородностей активных структур Тянь-Шаня во времени.

**Ключевые слова:** землетрясение, сейсмические волны, сейсмическая томография, скоростная неоднородность, коэффициент Пуассона, плотность, модуль сжатия, модуль сдвига или жёсткости.

**2020-ЖЫЛ ИЧИНДЕ KRNET, KNET ТАРМАКТАРЫНЫН САНАРИПТИК СТАНЦИЯЛАРЫ БОЮНЧА БОРБОРДУК ТЯНЬ-ШАНДЫН ЛОКАЛДЫК ЫЛДАМДЫГЫНЫН АР ТҮРДҮҮЛҮГҮ**

**Кыскача мазмуну.** Деталдуу сейсмикалык томографиянын бир варианты болгон Тянь-Шань кыртышынын локалдык ылдамдыгынын ар түрдүүлүгүн изилдөө методологиясын иштеп чыгуунун натыйжалары берилген. Тянь-Шань жер кыртышынын локалдык ылдамдык ар түрдүүлүгүнүн горизонталдык кесилиштеринин (5-10 км, 10-15 км, 15-20 км, 20-25 км, 25-30 км, 30-35 км тереңдиктерде) карта-схемалары, ошондой эле Кемин жер титирөөнүн (1911,  $K_R=17.8$ ,  $M_{LH}=8.2$ ) меридианындагы  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , Пуассон катышы, тыгыздык  $\rho$ , кысуу модулу  $K$ , жылуу модулу же катуулугу  $\mu$  параметрлери боюнча вертикалдык кесилиш локалдык ылдамдык ар түрдүүлүгүнүн моделдери көрсөтүлгөн. Убакыттын өтүшү менен Тянь-Шандын активдүү структураларынын ылдамдыгынын ар түрдүүлүгүнүн өзгөрүүсү белгиленди.

**Негизги сөздөр:** жер титирөө, сейсмикалык толкундар, сейсмикалык томография, ылдамдыктын ар түрдүүлүгү, Пуассон коэффициенти, тыгыздык, кысуу модулу, жылышуу же катуулук модулу.

**LOCAL VELOCITY HETEROGENEITY OF THE CENTRAL TIEN SHAN ACCORDING TO DIGITAL STATIONS OF THE KRNET (IS NAS KR), KNET (RS RAS) NETWORKS DURING 2020**

**Abstract.** The results of the study of local velocity heterogeneities of the Tien-Shan crust are given in the paper. This method is a variant of detailed seismic tomography. Map-scheme of horizontal sections of local velocity heterogeneities of the Tien-Shan's crust (at depths of 5-10 km, 10-15 km, 15-20 km, 20-25 km, 25-30 km, 30-35 km), as well as vertical section of local heterogeneities along the Kemin earthquake (1911,  $K_R=17.8$ ,  $M_{LH}=8.2$ ) by next parameters:  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , Poisson's ratio, density  $\rho$ , compression modulus  $K$ , shear modulus or modulus of rigidity  $\mu$ . The velocity heterogeneities change of the Tien-Shan's active structures in time is noted.

**Keywords:** earthquake, seismic waves, seismic tomography, velocity heterogeneity, Poisson's ratio, density, bulk modulus, shear modulus or modulus of rigidity.

Построение скоростных неоднородностей литосферы Тянь-Шаня и прослеживание этих неоднородностей во времени, по мере проявления очагов землетрясений в пределах активных структур является важной проблемой.

В 1993 г. была построена первая региональная (мелкомасштабная) трёхмерная модель земной коры и подкоровой части литосферы Тянь-Шаня с помощью сейсмической томографии [1] по данным аналоговых станций ИС НАН КР и цифровых станций сети KNET (НС РАН). После начались работы по составлению детальной модели скоростных неоднородностей, например, центральной части Северного Тянь-Шаня на основе записей сети KNET (НС РАН) сейсмических волн землетрясений и взрывов [2] с привлечением данных станций Китая. В 1998-2000 гг. сейсмическая сеть расширена включением 28 американских цифровых станций, установленных по проекту CHENGIS. В 2001-2004 гг. по имеющимся данным продолжены расчёты сейсмической томографии по методу Стива Рёкера [3, 4]. Построены скоростные модели земной коры и верхней мантии по семи меридиональным профилям, пересекающим Таримскую плиту, Тянь-Шань и Казахский щит [5]. В 2006 г. обобщены трёхмерные скоростные модели земной коры и верхней мантии Тянь-Шаня, построенные методом сейсмотомографии до глубин 200 км [6].

По точным записям цифровых станций сетей KNET, CHENGIS, IRIS/GSN (TLG) и GEOSCOPE (WUS) был проведён расчёт сейсмической томографии [7] по методу Zhao et al. [8] и построена трёхмерная модель скоростной неоднородности Центрального Тянь-Шаня. В дальнейшем точные данные цифровых станций сети KNET (НС РАН) позволяли достоверно определить скорости сейсмических волн очагов землетрясений северной части Центрального Тянь-Шаня и построить модели локальной скоростной неоднородности земной коры [9]. На южной части Среднего Тянь-Шаня на меридиане озёр Чатыркол–Сонкол Российской академией наук и др. проведён комплексный геофизический (МОВ-ОГТ, МОВЗ и сейсмотомографии) профиль «MANAS», выделены вертикальные и латеральные скоростные неоднородности земной коры [10].

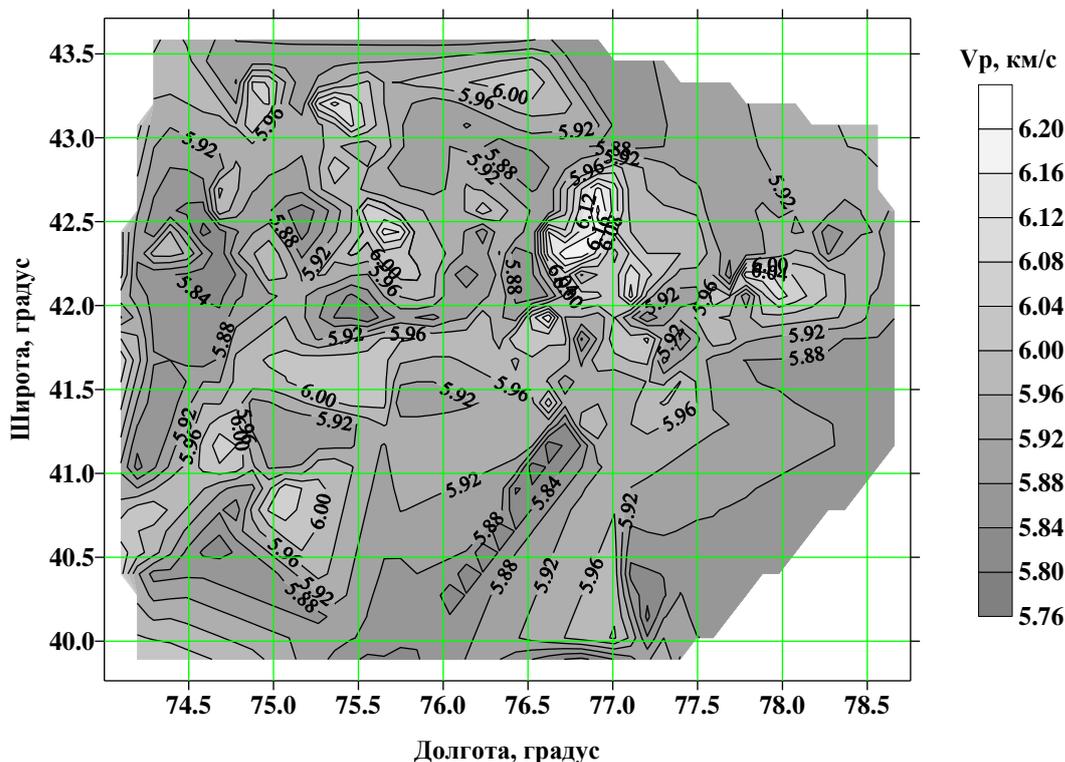
Исходными данными исследований служат записи цифровых сейсмических станций, сейсмические бюллетени и каталог землетрясений Института сейсмологии НАН КР [11]. Параметры продольной волны изучались по записи  $Z$  –компоненты (вертикальной), а параметры поперечной волны – по записи одной из компонент с наилучшим соотношением «сигнал/шум». Оценивались значения  $\sigma_{rms}$  – среднеквадратическое отклонение времён пробега наблюдаемых и вычисленных (погрешность),  $\sigma_e$  – стандартное отклонение от времени вступления,  $d$  – класс точности определения эпицентра,  $she$  – 68%-ный доверительный интервал в определении положения эпицентра, глубина события, определяемая по заложенным скоростным моделям (depth) и по методике, заложенной в программе Hypoellipse [12] (hz),  $sez$  – 68%-ный доверительный интервал в определении глубины и т.д.

Методика исследования является вариантом детальной сейсмической томографии. Определялись скорости сейсмических волн каждого очага путём составления индивидуальных годографов. Значения скоростей относились к гипоцентрам землетрясений и с помощью компьютерных программ составлены комплексы карт-схем горизонтальных разрезов - двухмерных локальных скоростных неоднородностей  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  по интервалам глубин: 5-10 км, 10-15 км, 15-20 км, 20-25 км, 25-30 км и 30-35 км (рисунки 1, 3, 4). Выделены относительно высокоскоростные, низкоскоростные и переходные локальные скоростные неоднородности на каждом горизонте глубин Тянь-Шаня. Они приурочены к разным частям активных структур земной коры. Распределение их имеет мозаичный характер. Система горизонтальных

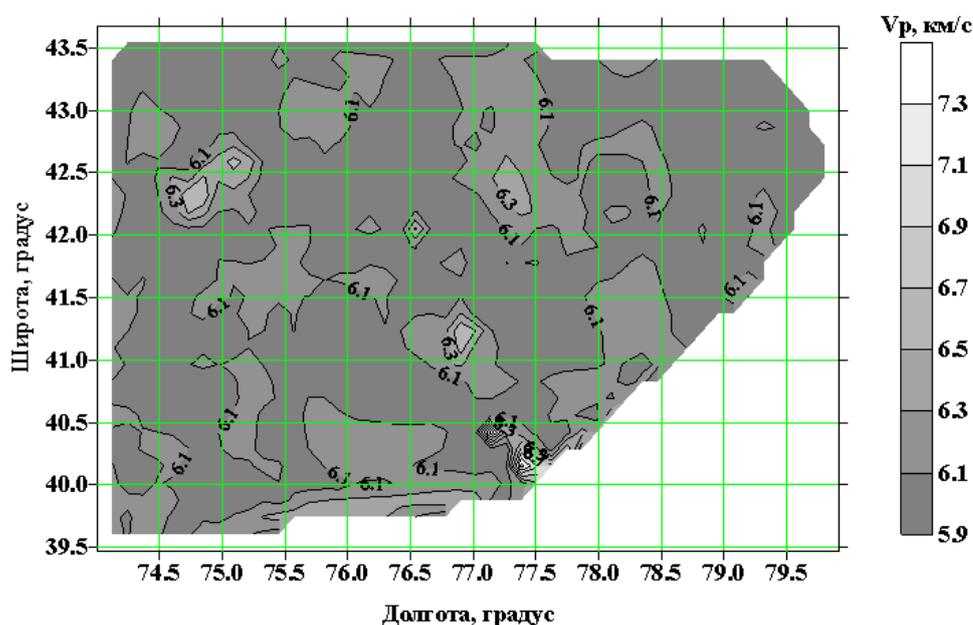
разрезов - двумерных скоростных неоднородностей представляют собой трёхмерные скоростные локальные неоднородности Тянь-Шаня. Одновременно составлялись карты-схемы времени проявления локальных неоднородностей (рисунок 2), а также вертикальные разрезы локальных неоднородностей по параметрам:  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , коэффициента Пуассона, плотности  $\rho$ , модуля сжатия  $K$ , модуля сдвига  $\mu$ , в частности на меридиане крупного землетрясения Кемин (1911 г.,  $K_R=17.8$ ,  $M_{LH}=8.2$ ) (рисунки 5-12).

Рассмотрим системы горизонтальных разрезов - двумерных скоростных  $V_p$  локальных неоднородностей (рисунок 1).

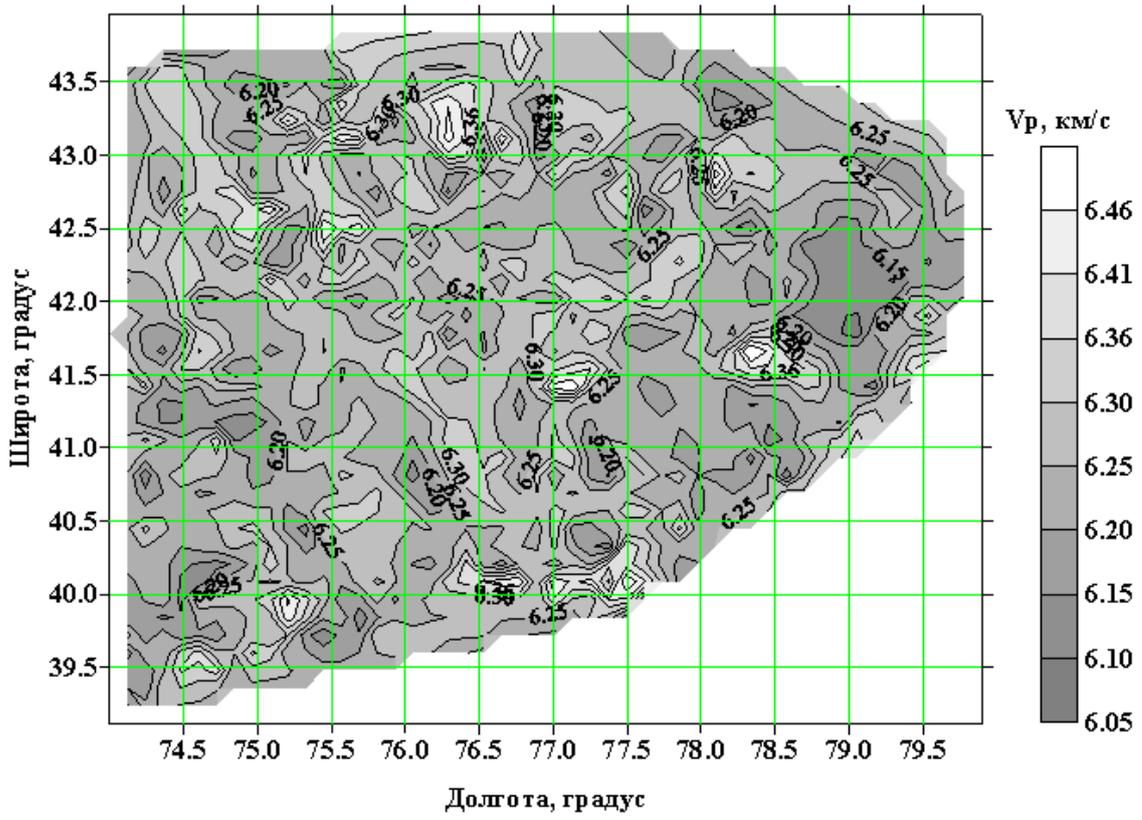
А



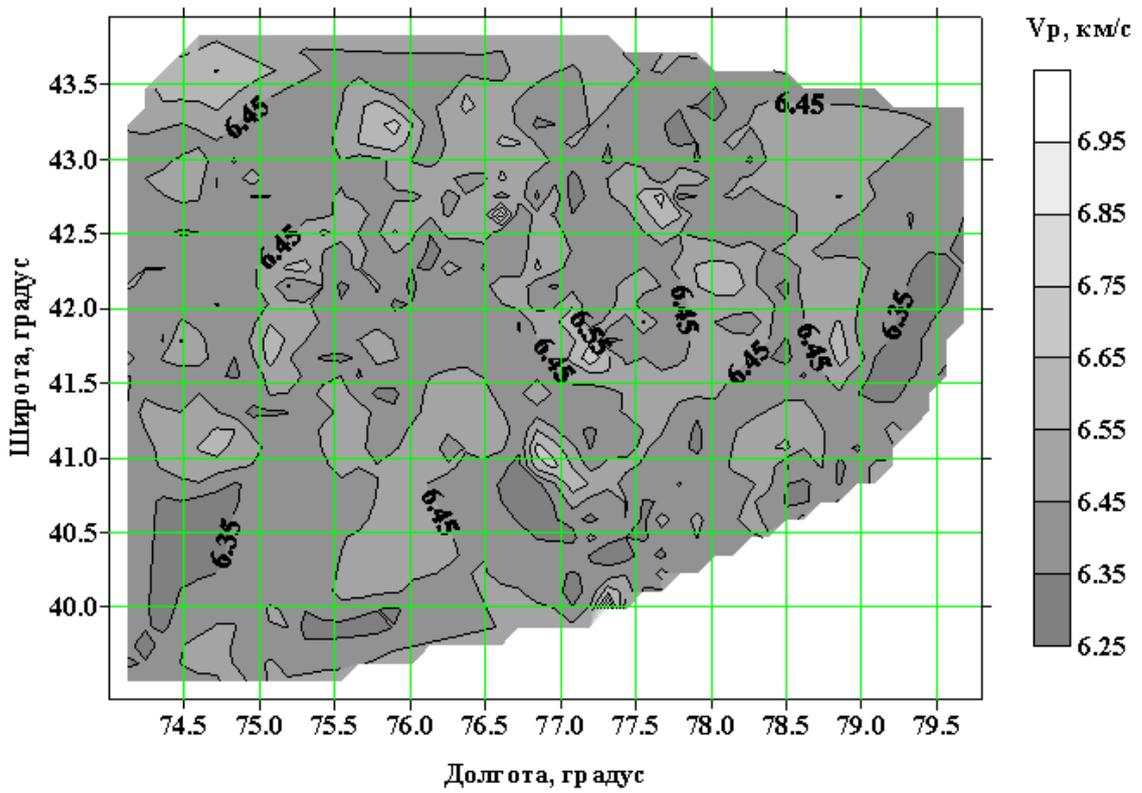
Б



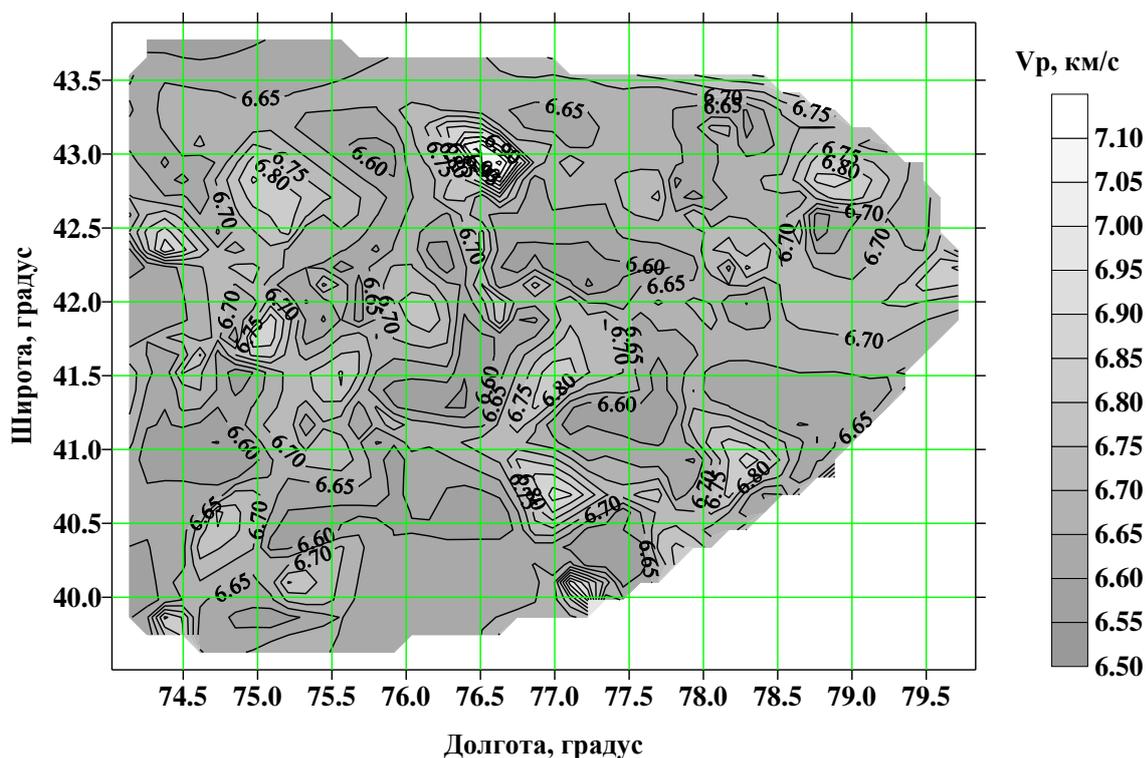
В



С



Д



Е

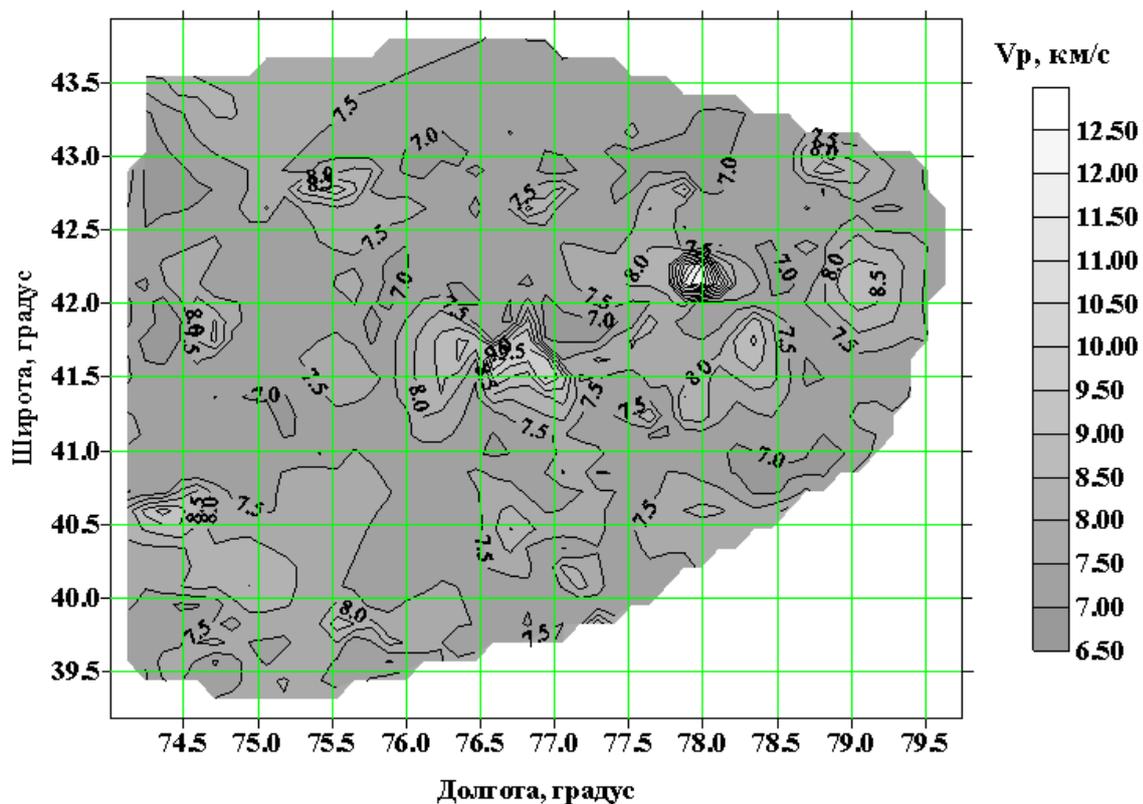


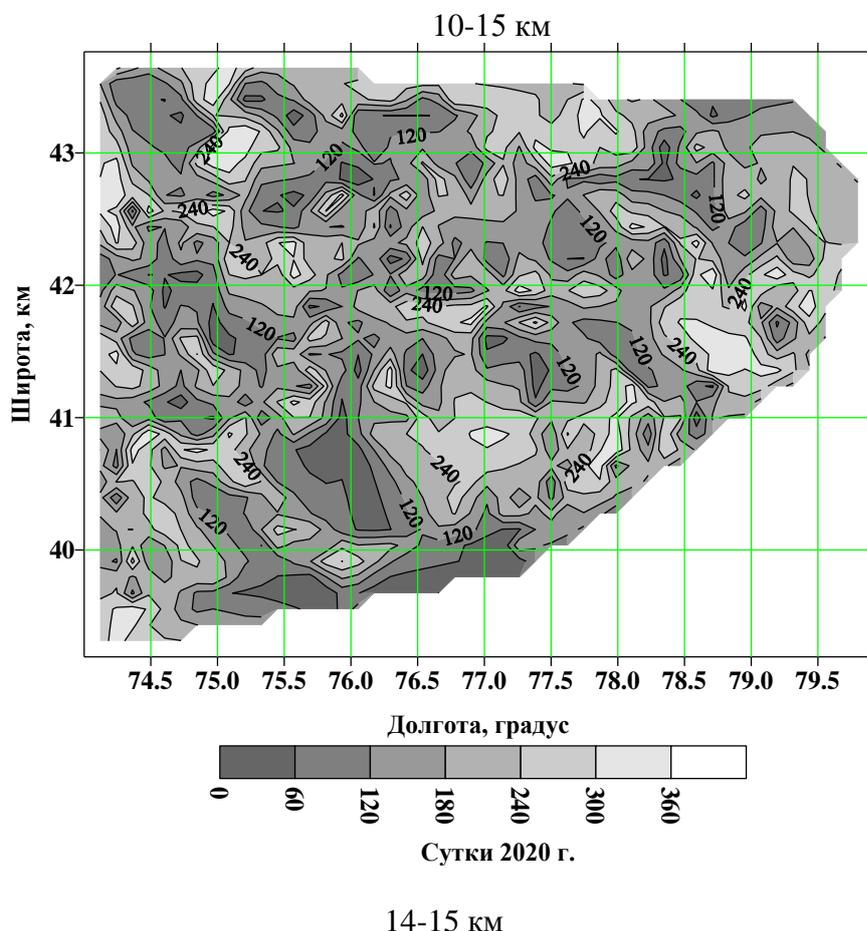
Рисунок 1. Карта - схема локальных скоростных неоднородностей (в течение 2020 г.) по продольным сейсмическим волнам  $V_p$  (км/с) очагов землетрясений Центрального Тянь-Шаня на горизонтальных разрезах - глубинах: А- 5-10 км, Б-10-15 км, В-15-20 км, С-20-25 км, Д-25-30 км, Е- 30-35 км на основе данных цифровых сейсмических станций сетей KNET (НС РАН), KRNET (ИС НАН КР), Казахстана, Узбекистана.

Вероятные значения высокоскоростных и низкоскоростных  $V_p$  неоднородностей Тянь-Шаня на разных горизонтальных разрезах- глубинах земной коры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Вероятные значения высокоскоростных и низкоскоростных  $V_p$  неоднородностей Тянь-Шаня на горизонтальных разрезах - глубинах земной коры.

№ п.п.	Глубина, км.	Скоростная неоднородность, км/с	
		высокая	низкая
1.	5-10	$\geq 6.00$	$< 5.88$
2.	10-15	$> 6.30$	$< 6.10$
3.	15-20	$> 6.30$	$< 6.20$
4.	20-25	$> 6.45$	$< 6.35$
5.	25-30	$> 6.75$	$< 6.60$
6.	30-35	$\geq 8.00$	$< 7.50$

На рисунке 2 показано проявление локальных скоростных неоднородностей Тянь-Шаня во времени на различных глубинах земной коры, в качестве примера 10-15 км, 20-25 км, 30-35 км в течение 2020 г. Отмечено, что локальные скоростные неоднородности рождаются в отдельных частях активных структур земной коры и в дальнейшем они проявляются в других частях. Например, локальная скоростная неоднородность сначала проявилась на глубинах 30-35 км под восточной частью Кунгейского поднятия, на глубинах 20-25 км под центральной частью Кунгейского поднятия, на глубинах 10-15 км под западными частями Кунгейского и Заилийского поднятий.



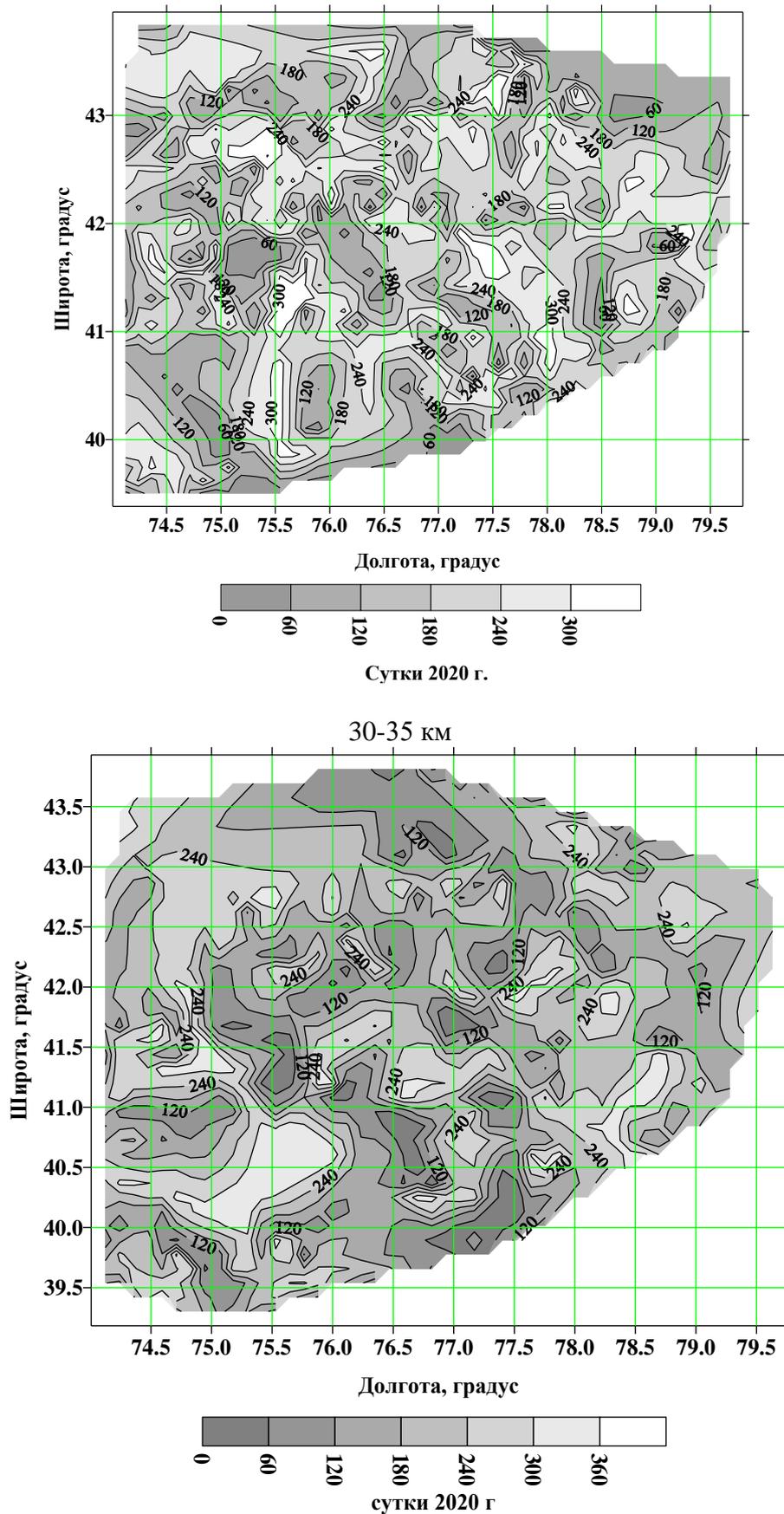
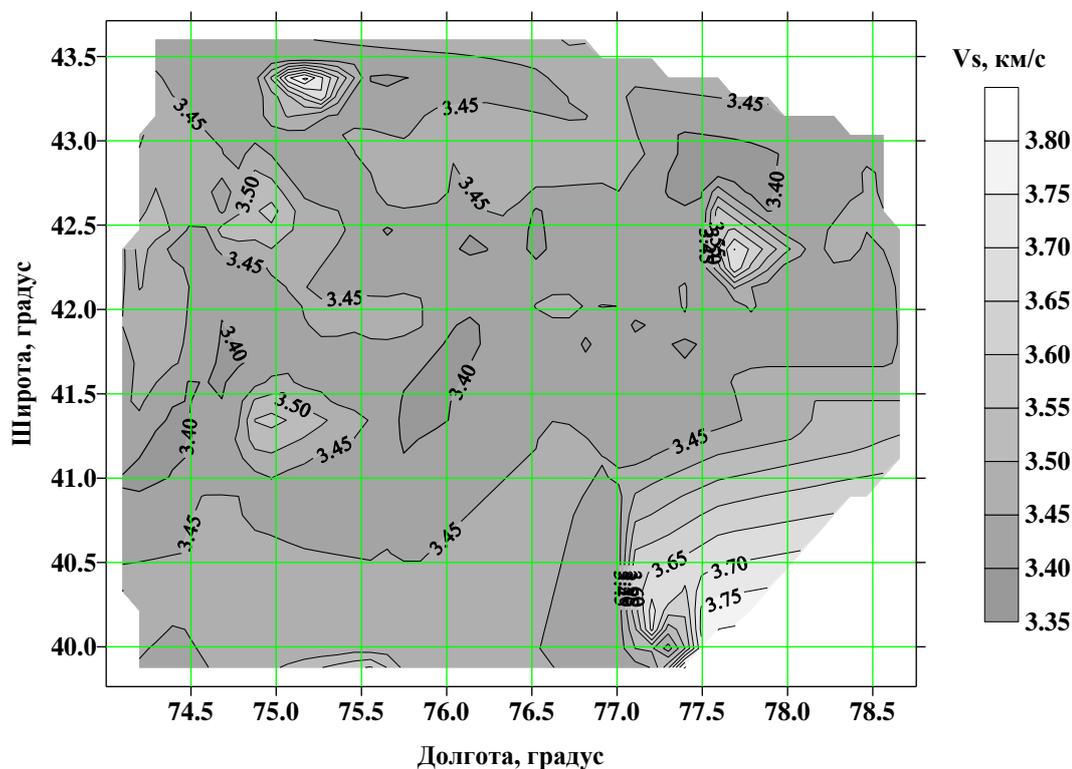


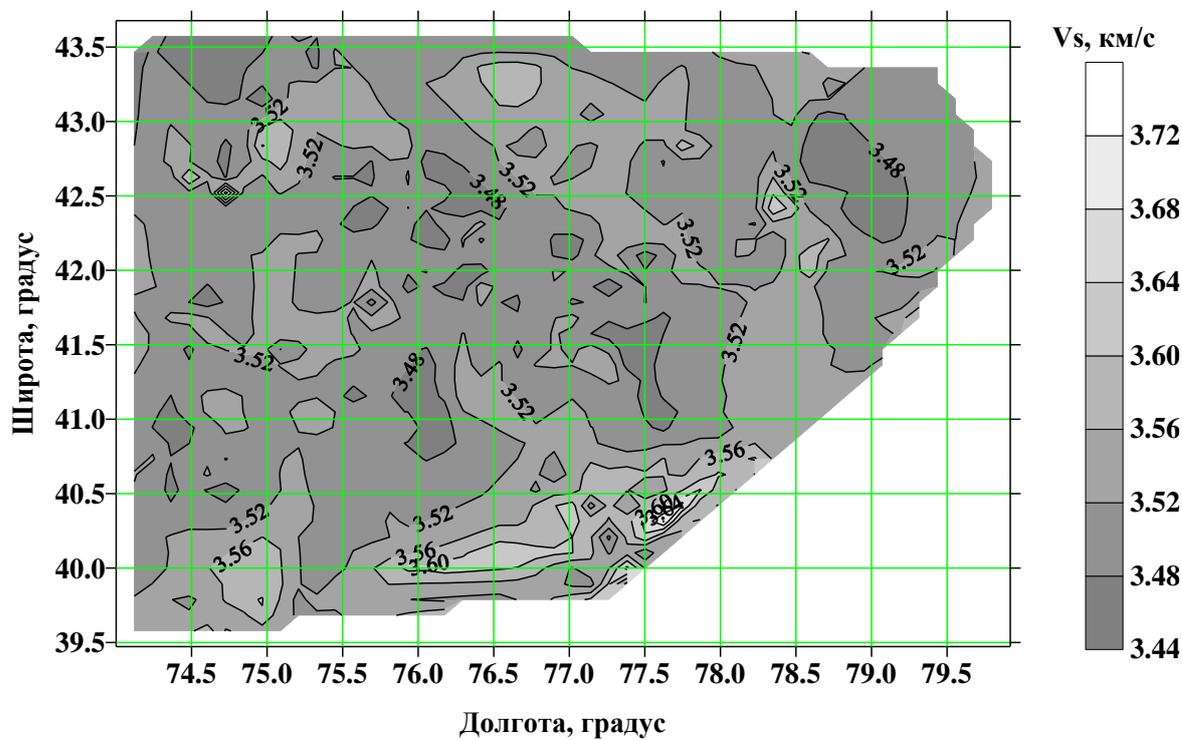
Рисунок 2. Карта - схема времени проявления – «рождения» локальных скоростных неоднородностей Тянь-Шаня на 10-15 км, 20-25 км, 30-35 км глубинах земной коры.

Далее рассмотрим системы горизонтальных разрезов - двумерных локальных скоростных  $V_s$  неоднородностей (рисунок 3).

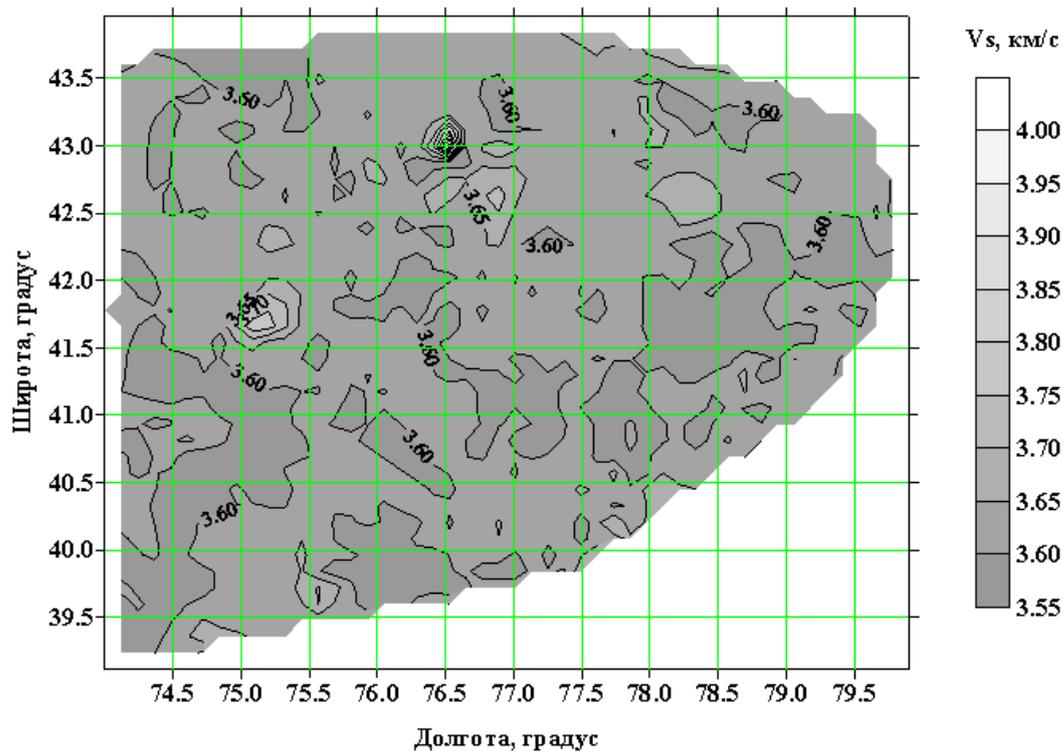
А



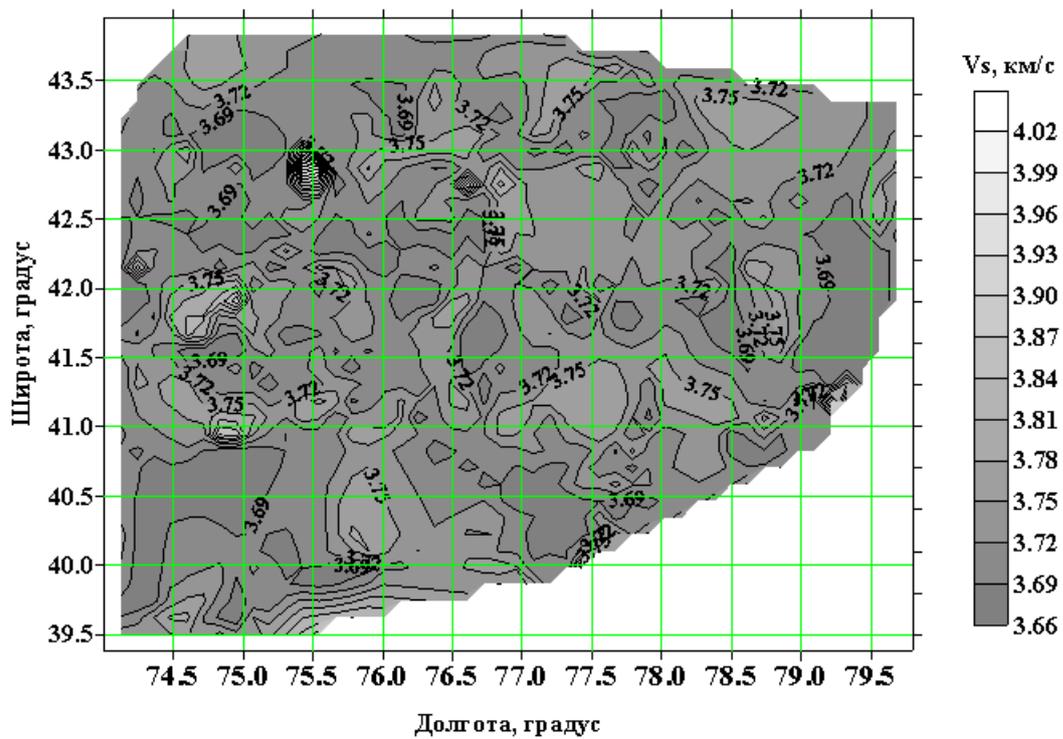
Б



В



С



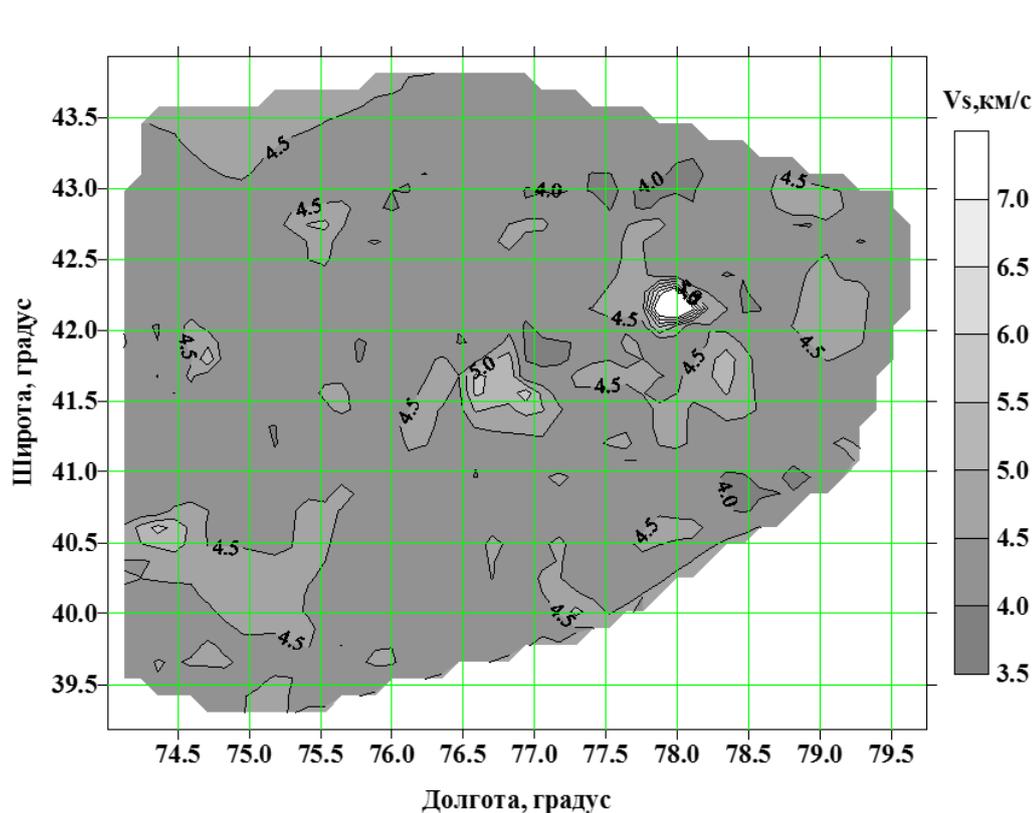
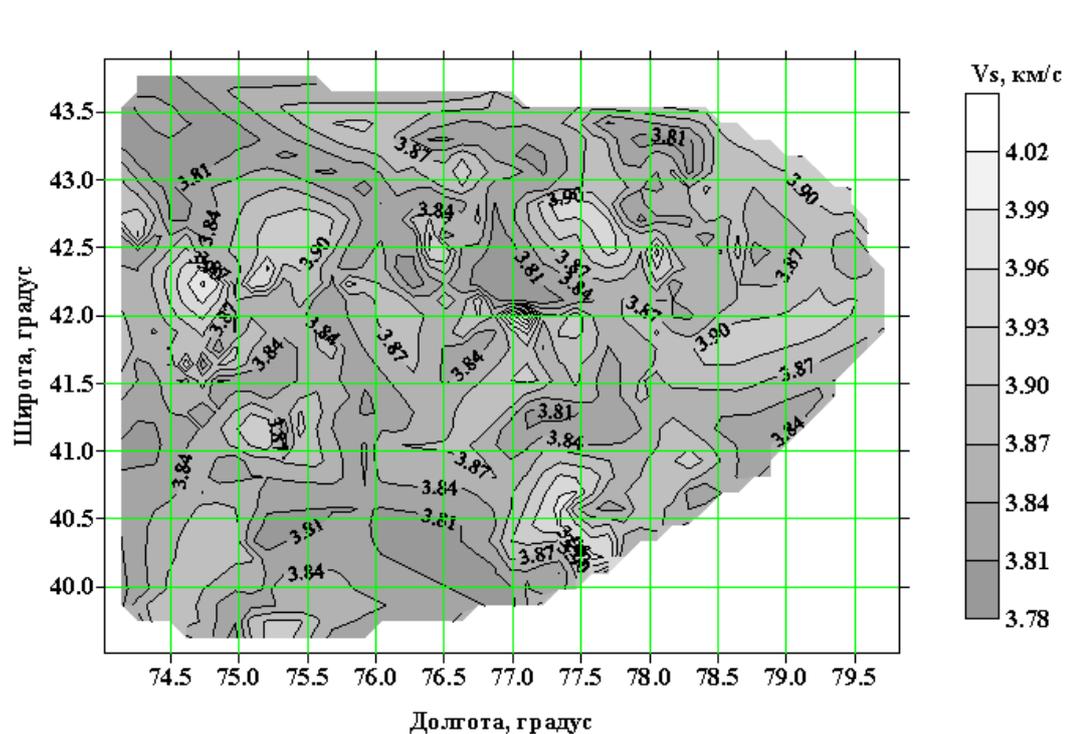


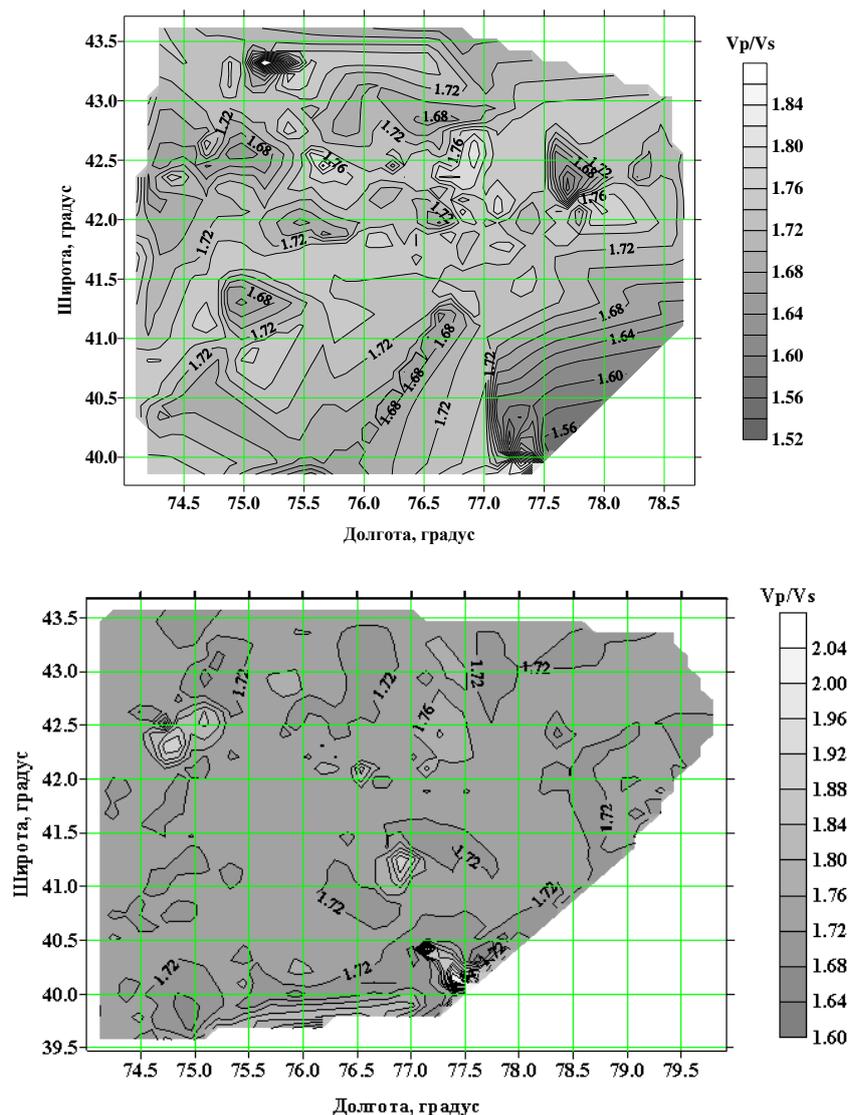
Рисунок 3. Карта – схема локальных скоростных неоднородностей (в течение 2020 г.) по поперечным сейсмическим волнам  $V_s$  (км/с) очагов землетрясений Центрального Тянь-Шаня на горизонтальных разрезах- глубинах: А- 5-10 км, Б-10-15 км, В-15-20 км, С-20-25 км, Д-25-30 км, Е- 30-35 км на основе данных цифровых сейсмических станций сетей КNET (ИС РАН), КRNET (ИС НАН КР), Казахстана, Узбекистана.

Вероятные значения высокоскоростных и низкоскоростных  $V_s$  неоднородностей Тянь-Шаня в горизонтальных разрезах на разных глубинах земной коры приведены в таблице 2.

Таблица 2. Вероятные значения высокоскоростных и низкоскоростных  $V_s$  неоднородностей Тянь-Шаня в горизонтальных разрезах на разных глубинах земной коры.

№ пп	Глубина, км	Скоростная неоднородность, км/с	
		высокая	низкая
1.	5-10	$\geq 3.50$	$< 3.40$
2.	10-15	$> 3.52$	$< 3.48$
3.	15-20	$> 3.65$	$< 3.60$
4.	20-25	$> 3.75$	$< 3.72$
5.	25-30	$> 3.90$	$< 3.84$
6.	30-35	$\geq 4.50$	$< 4.00$

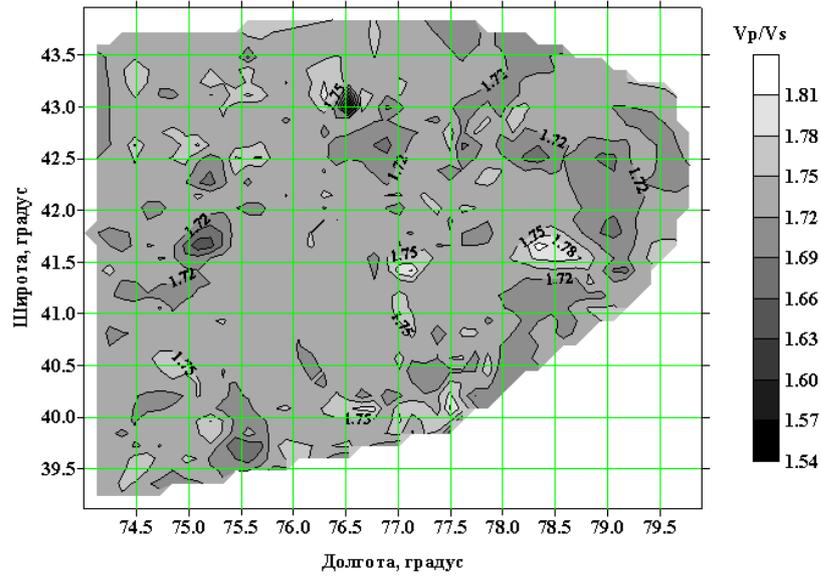
В дальнейшем рассмотрим системы двумерных локальных скоростных  $V_p/V_s$  неоднородностей (рисунок 4).



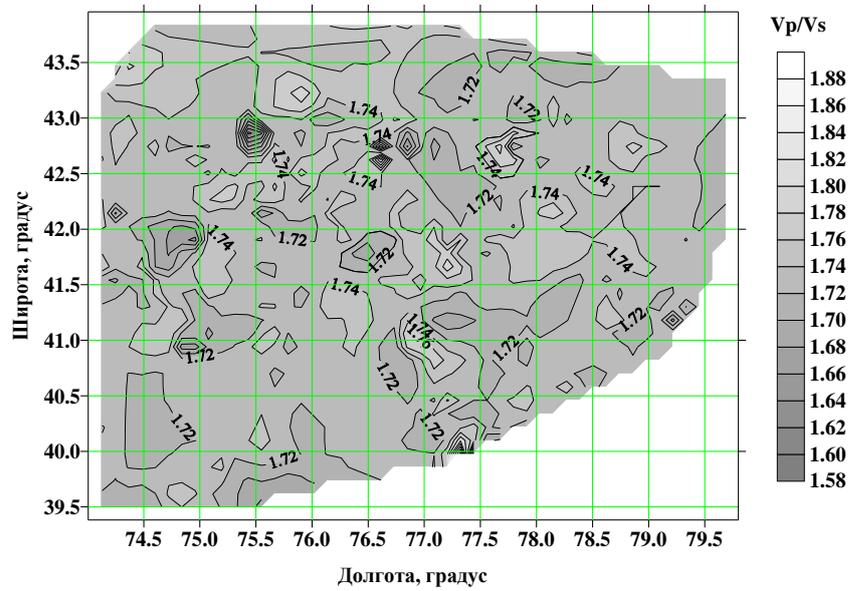
А

Б

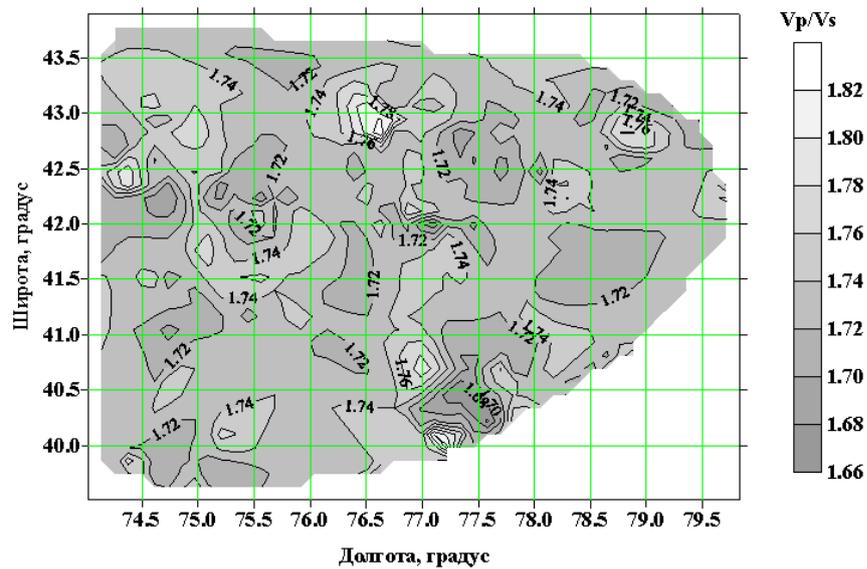
В



С



Д



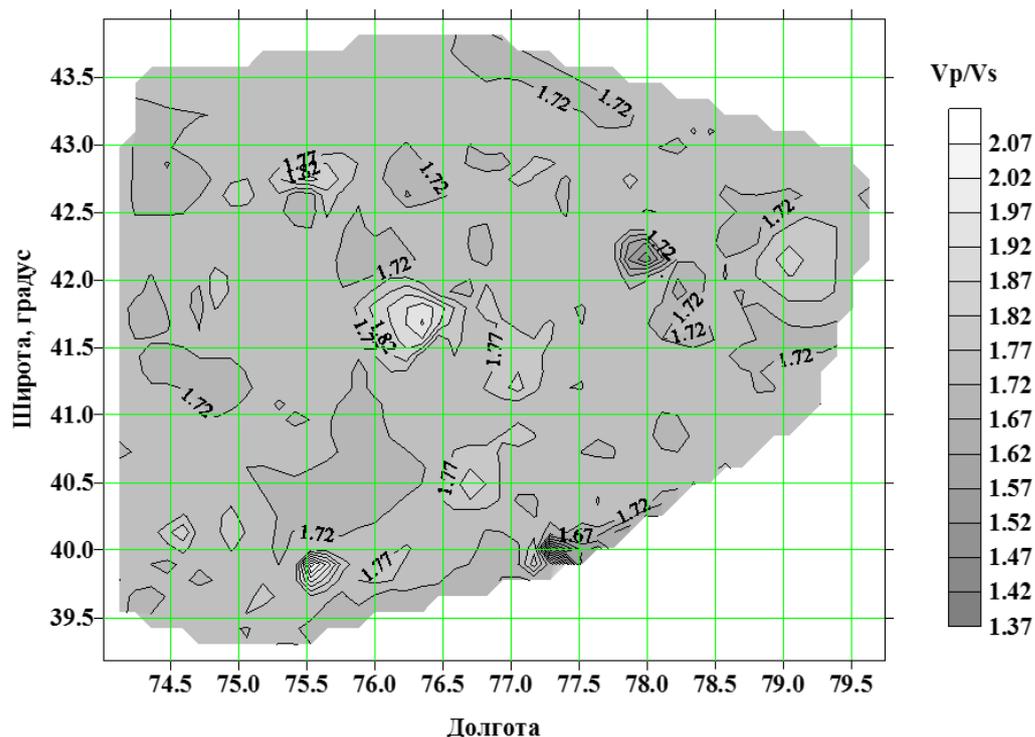


Рисунок 4. Карта - схема двумерных локальных скоростных неоднородностей (в течение 2020 г.) по отношению продольных и поперечных сейсмических волн  $V_p/V_s$  очагов землетрясений Центрального Тянь-Шаня на горизонтальных разрезах – на глубинах: А- 5-10 км, Б-10-15 км, В-15-20 км, С-20-25 км, Д-25-30 км, Е- 30-35 км на основе данных цифровых сейсмических станций сетей KNET (ИС РАН), KRNET (ИС НАН КР), Казахстана, Узбекистана.

Вероятные значения высокоскоростных и низкоскоростных  $V_p/V_s$  неоднородностей Тянь-Шаня в горизонтальных разрезах на разных глубинах земной коры приведены в таблице 3.

Таблица 3. Вероятные значения высокоскоростных и низкоскоростных  $V_p/V_s$  локальных неоднородностей Тянь-Шаня в горизонтальных разрезах на разных глубинах земной коры.

№ пп	Глубина, км	Скоростная неоднородность $V_p/V_s$	
		высокая	низкая
1.	5-10	$\geq 1.74$	$< 1.68$
2.	10-15	$> 1.76$	$< 1.72$
3.	15-20	$> 1.75$	$< 1.72$
4.	20-25	$> 1.74$	$< 1.72$
5.	25-30	$> 1.74$	$< 1.72$
6.	30-35	$\geq 1.77$	$< 1.72$

Совместный анализ локальных скоростных неоднородностей  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  на одинаковых глубинах показал, что локальные неоднородности могут быть разделены на три группы:

1.  $V_p/V_s < 1.72$  - малые значения  $V_p$  и  $V_s$ ;
2.  $V_p/V_s > 1.72$  - малые значения  $V_p$  и  $V_s$ ;
3.  $V_p/V_s > 1.72$  - большие значения  $V_p$  и  $V_s$ .

Здесь можно сказать [13], что первая группа неоднородностей может быть связана с проявлением флюидов, вторая группа неоднородностей – с проявлением частичного плавления, третья группа неоднородностей – с проявлением высоких давлений.

Наибольший интерес вызывает изучение скоростных неоднородностей по профилям. В качестве примера рассмотрим профиль скоростных локальных неоднородностей Тянь-Шаня на меридиане крупного землетрясения Кемин ( $K_R=17.8$ ,  $M=8.2$ ,  $I_0=10-11$  баллов,  $h=25$  км,  $\varphi=42.90^\circ$ ,  $\lambda=76.90^\circ$ ). На рисунке 5 приведён вертикальный разрез локальных скоростных  $V_p$  неоднородностей (по меридиану  $\lambda=76.90^\circ$  между широтами от  $\varphi=39^\circ$  до  $\varphi=44^\circ$ ).

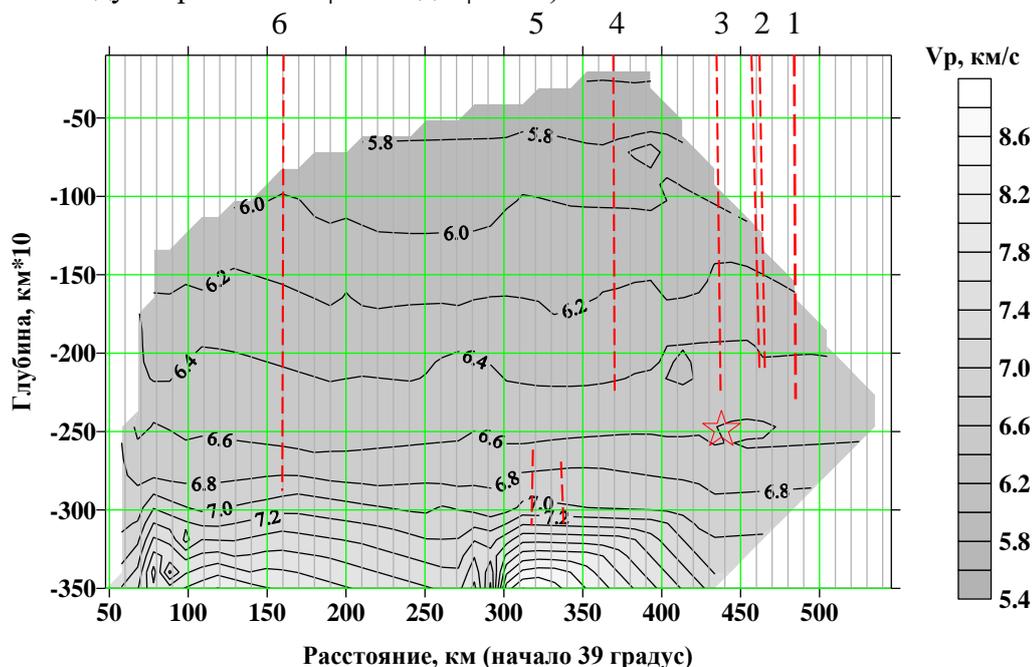


Рисунок 5. Вертикальный разрез локальных скоростных  $V_p$  неоднородностей Тянь-Шаня на меридиане крупного землетрясения Кемин ( $K_R=17.8$ ,  $M=8.2$ ,  $I_0=10-11$  баллов,  $h=25$  км,  $\varphi=42.90^\circ$ ,  $\lambda=76.90^\circ$ ). Звёздочкой обозначен гипоцентр Кеминского землетрясения. Пунктирными линиями красного цвета обозначен ряд активных разломов: 1-Заили, 2-Северный Кемин и Южный Кемин, 3- Предзападный-Кемин, 4- Восточный Терской, 5- Южный Жетим, 6-Южный Кельпинтаг.

Распределение времени проявления локальных скоростных неоднородностей Тянь-Шаня на вертикальном разрезе по меридиану (в пределах  $\lambda=76.90^\circ$ ) Кеминского землетрясения представлено на рисунке 6. Ранние проявления локальных скоростных неоднородностей (ЛСН) отмечены на сочленении Тянь-Шаня и Тарима на широтах около  $\varphi=40^\circ$ ; в пределах Срединного Тянь-Шаня на глубинах около 5-35 км на широтах  $\varphi=41.5^\circ-42.0^\circ$ ; на сочленении Тянь-Шаня и Казахского щита на глубинах около 15-35 км на широтах около  $\varphi=42,6^\circ$  и  $43^\circ$ . В дальнейшем между ранними ЛСН наблюдались поздние проявления. Соответственно, здесь развиваются процессы динамики локальных неоднородностей литосферы Тянь-Шаня, представляющие новое направление сейсмической томографии.

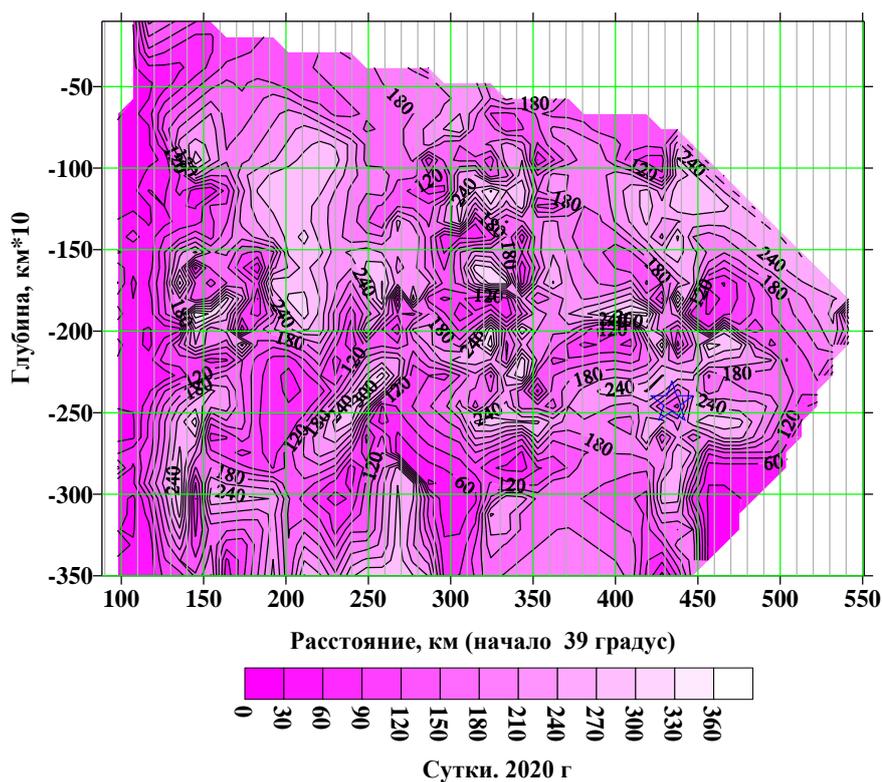


Рисунок 6. Распределение времени проявления в сутках 2020 г. локальных неоднородностей Тянь-Шаня на вертикальном разрезе по меридиану крупного землетрясения Кемин ( $K_R = 17.8$ ,  $M = 8.2$ ,  $I_0 = 10-11$  баллов,  $h = 25$  км,  $\varphi = 42.90^\circ$ ,  $\lambda = 76.90^\circ$ ) между широтами  $\varphi = 39-44^\circ$ . Звёздочкой обозначен гипоцентр Кеминского землетрясения.

На рисунке 7 приведён вертикальный разрез локальных скоростных  $V_s$  неоднородностей Тянь-Шаня на меридиане ( $\lambda = 76.90^\circ$ ) сильного Кеминского землетрясения.

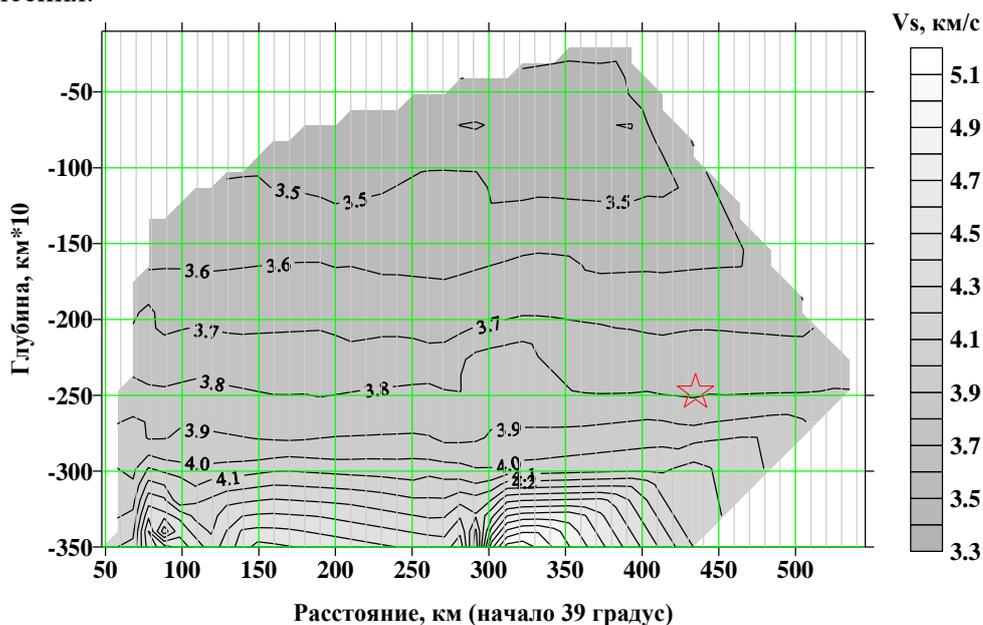


Рисунок 7. Вертикальный разрез локальных скоростных  $V_s$  неоднородностей Тянь-Шаня на меридиане крупного землетрясения Кемин ( $K_R = 17.8$ ,  $M = 8.2$ ,  $I_0 = 10-11$  баллов,

$h=25$  км,  $\varphi=42.90^\circ$ ,  $\lambda=76.90^\circ$ ). Звёздочкой обозначен гипоцентр Кеминского землетрясения.

На рисунке 8 приведён вертикальный разрез локальных скоростных  $V_p/V_s$  неоднородностей Тянь-Шаня на меридиане ( $\lambda=76.90^\circ$ ) сильного Кеминского землетрясения.

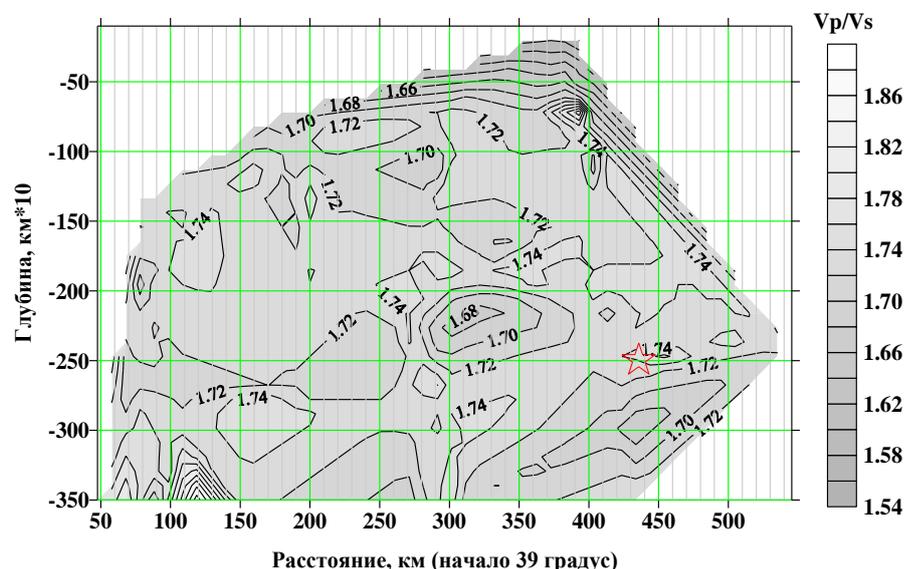


Рисунок 8. Вертикальный разрез локальных скоростных  $V_p/V_s$  неоднородностей Тянь-Шаня на меридиане сильного Кеминского землетрясения ( $K_R = 17.8$ ,  $M=8.2$ ,  $I_0=10-11$  баллов,  $h=25$  км,  $\varphi=42.90^\circ$ ,  $\lambda=76.90^\circ$ ). Звёздочкой обозначен гипоцентр Кеминского землетрясения.

Важно рассмотреть распределение на вертикальном разрезе значений коэффициента Пуассона, что является величиной отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению (рисунок 9). Значения коэффициента определялись по общеизвестной в практике формуле на основе данных скоростей  $V_p$  и  $V_s$ . Они изменяются в пределах 0.15-0.30. Соответственно, относительное продольное растяжения в земной коре достаточно большое, чем поперечное сжатие.

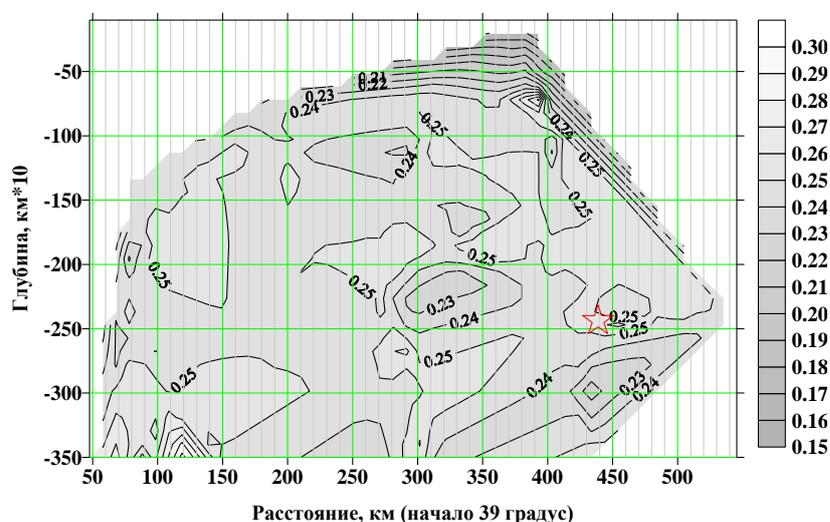


Рисунок 9. Вертикальный разрез распределения коэффициента Пуассона в локальных скоростных неоднородностях Тянь-Шаня на меридиане сильного Кеминского

землетрясения ( $K_R = 17.8$ ,  $M=8.2$ ,  $I_0=10-11$  баллов,  $h=25$  км,  $\varphi=42.90^\circ$ ,  $\lambda=76.90^\circ$ ). Звёздочкой обозначен гипоцентр Кеминского землетрясения.

На рисунке 10 показано распределение плотности на вертикальном разрезе. Для этого определено соотношение плотности горных пород ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) и скорости  $V_p$  (км/с) сейсмической волны на основе экспериментальных данных [14, 15]:

$$\rho = 0,021V_p^4 - 0,615 V_p^3 + 6,4788V_p^2 + 28,768V_p + 47,919. \quad (1)$$

На вертикальном разрезе отмечается, что значения плотности среды земной коры повышается сверху вниз от 2.6-2.7 г/см<sup>3</sup> до 3.6 г/см<sup>3</sup> на глубинах 30-35 км. На поле плотности наблюдаются своеобразные складки и высокоградиентные зоны. Плотность среды в пределах гипоцентра (около 25 км) Кеминского землетрясения составляет порядка 3.25-3.30 г/см<sup>3</sup>

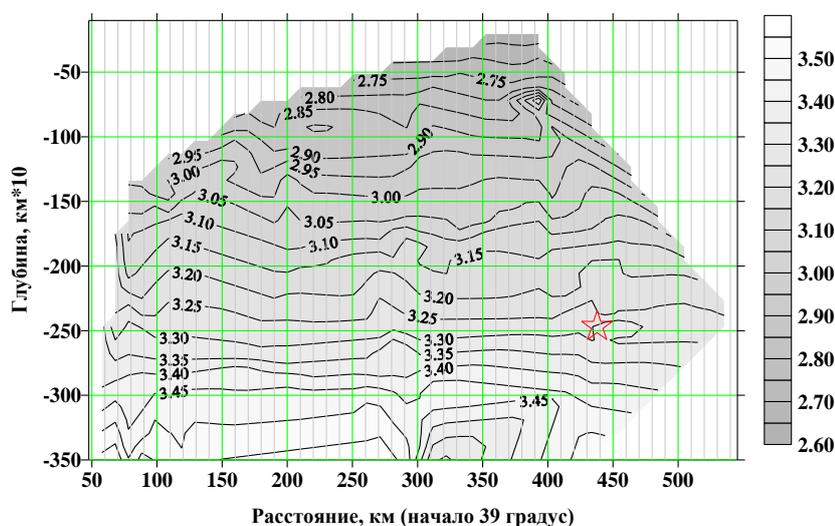


Рисунок 10. Вертикальный разрез распределения плотности массива горных пород (г/см<sup>3</sup>) в локальных скоростных неоднородностях Тянь-Шаня на меридиане сильного Кеминского землетрясения ( $K_R = 17.8$ ,  $M=8.2$ ,  $I_0=10-11$  баллов,  $h=25$  км,  $\varphi=42.90^\circ$ ,  $\lambda=76.90^\circ$ ). Звёздочкой обозначен гипоцентр Кеминского землетрясения.

Распределение значения модуля сжатия ( $K \cdot 10^{12}$ , дин/см<sup>2</sup>) на вертикальном разрезе приведён на рисунке 11. Модуль объёмного сжатия ( $K$ ) вещества является мерой сопротивления вещества объёмному сжатию. Для этого определён сейсмический параметр ( $\Phi$ ) Адамса-Вильямсона:

$$\Phi = V_p^2 - 4/3V_s^2 = K/\rho, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – сейсмический параметр,  $V_p$ ,  $V_s$  – скорости продольных и поперечных сейсмических волн,  $K$  – модуль сжатия,  $\rho$  – плотность среды и соотношение модуля сжатия ( $K \cdot 10^{12}$ , дин/см<sup>2</sup>) и сейсмического параметра  $\Phi$ :

$$K = (0.0001\Phi^2 + 0.037\Phi - 0.1687) \times 10^{12}, \text{ дин/см}^2. \quad (3)$$

На вертикальном разрезе отмечается, что значения модуля сжатия среды земной коры повышается сверху вниз от  $(0.4-0.5) \times 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup> до  $(1.4-1.5) \times 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup> на глубинах 30-35 км. На поле модуля сжатия наблюдаются своеобразные изгибы и высокоградиентные субвертикальные зоны. Модуль сжатия среды в пределах гипоцентра (около 25 км) землетрясения Кемин (1911 г.) составляет порядка  $(0.7-0.8) \times 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>.

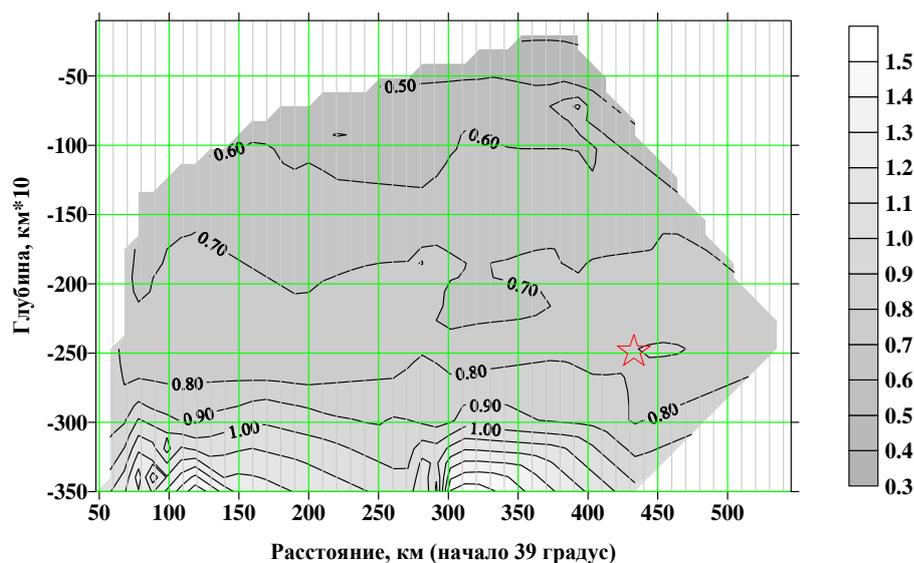


Рисунок 11. Вертикальный разрез распределения модуля сжатия  $K$ ,  $10^{12}$  дин/см<sup>2</sup> в локальных скоростных неоднородностях Тянь-Шаня на меридиане сильного Кеминского землетрясения ( $K_R = 17.8$ ,  $M=8.2$ ,  $I_0=10-11$  баллов,  $h=25$  км,  $\varphi=42.90^\circ$ ,  $\lambda=76.90^\circ$ ). Звёздочкой обозначен гипоцентр Кеминского землетрясения.

На рисунке 12 показано распределение жёсткости на вертикальном разрезе земной коры. Для этого определено соотношение жёсткости - модуля сдвига горных пород ( $\mu$ ,  $10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>) и скорости  $V_p$  (км/с) сейсмической волны на основе экспериментальных данных [14, 15]:

$$\mu = (0.003V_p^3 + 0.0475V_p^2 - 0.3897V_p + 0.6729) \times 10^{12}, \text{ дин/см}^2. \quad (4)$$

На вертикальном разрезе отмечается, что значения жёсткости среды земной коры повышаются сверху вниз от  $(3.0-3.5)10^{12}$  дин/см<sup>2</sup> до  $(6.0-6.3)10^{12}$  дин/см<sup>2</sup> на глубинах 30-35 км. На поле жёсткости наблюдаются своеобразные изгибы изолиний и высоко градиентные зоны. Жёсткость среды в пределах гипоцентра (около 25 км) землетрясения Кемин составляет порядка  $(4.5-5.2)10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>. Рассматривая вертикальный разрез поля жёсткости в связи с моделью (формулой) Аки:

$$M_0 = \mu UA, \quad (5)$$

где  $M_0$  – сейсмический момент (дин·см),  $\mu$  – жёсткость (дин/см<sup>2</sup>),  $U$  – средняя подвижка по разлому очага (см),  $A$  – площадь разлома (см<sup>2</sup>), например, очаг Кеминского землетрясения ( $K_R = 17.8$ ,  $M=8.2$ ,  $I_0=10-11$  баллов,  $h=25$  км,  $\varphi=42.90^\circ$ ,  $\lambda=76.90^\circ$ ) протяжённостью около 150 км и мощностью слоёв: 5-10 км, 10-15 км, 15-20 км, 20-25 км, 30-35 км имеет площадь  $A=750 \times 10^{10}$  см<sup>2</sup> со средней подвижкой около  $U=750$  см. В соответствии с величинами жёсткости на различных горизонтах земной коры могут быть различные значения сейсмического момента. Например, сейсмический момент в пределах гипоцентра на глубине около 25 км на горизонте 20-25 км, где  $\mu = 4,52 \times 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>, составит:

$$M_0 = 4,52 \times 10^{12} \cdot 750 \cdot 750 \times 10^{10} = 2.5 \times 10^{28} \text{ дин} \cdot \text{см};$$

на горизонте 15-20 км -  $M_0 = 4,0 \times 10^{12} \cdot 750 \cdot 750 \times 10^{10} = 2.2 \times 10^{28}$  дин·см;

на горизонте 10-15 км -  $M_0 = 3.5 \times 10^{12} \cdot 750 \cdot 750 \times 10^{10} = 1.92 \times 10^{28}$  дин·см;

на горизонте 5-10 км -  $M_0 = 3.0 \times 10^{12} \cdot 750 \cdot 750 \times 10^{10} = 1.6 \times 10^{28}$  дин·см.

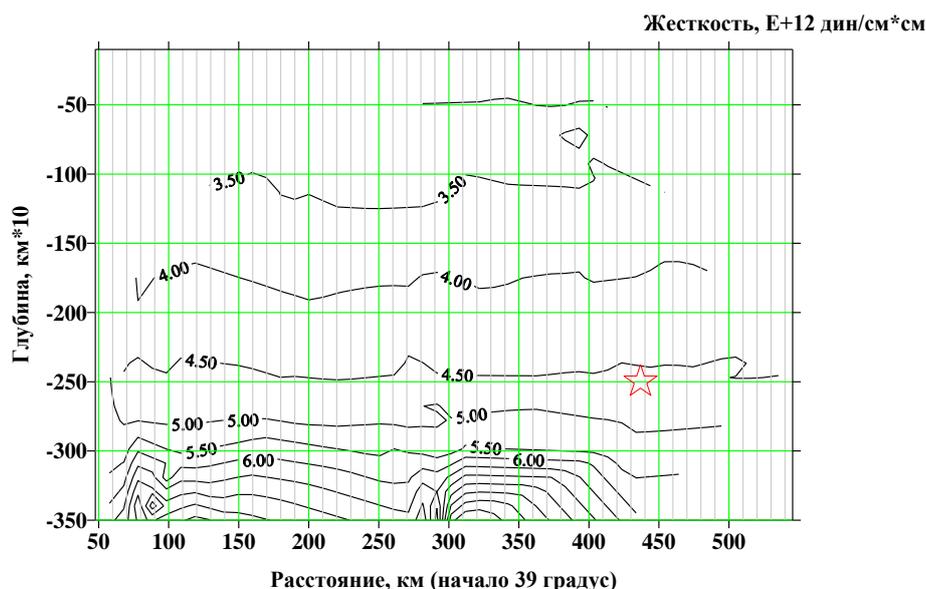


Рисунок 12. Вертикальный разрез распределения жёсткости  $\mu$ ,  $10^{12}$  дин/см<sup>2</sup> в локальных скоростных неоднородностях Тянь-Шаня на меридиане сильного Кеминского землетрясения ( $K_R = 17.8$ ,  $M = 8.2$ ,  $I_0 = 10-11$  баллов,  $h = 25$  км,  $\varphi = 42.90^\circ$ ,  $\lambda = 76.90^\circ$ ). Звёздочкой обозначен гипоцентр Кеминского землетрясения.

### Заключение

1. Разработана методика изучения локальных скоростных неоднородностей, представляющая собой вариант детальной сейсмической томографии;
2. Составлены модели – карты-схемы горизонтальных разрезов локальных скоростных неоднородностей земной коры (на глубинах 5-10 км, 10-15 км, 15-20 км, 20-25 км, 25-30 км, 30-35 км) Тянь-Шаня по параметрам:  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  по данным сетей цифровых станций, в частности за 2020 г. Распределение этих неоднородностей имеет мозаичный характер. Осуществлялось слежение времени проявления скоростных неоднородностей. Отмечено, что локальные скоростные неоднородности рождаются в отдельных частях активных структур земной коры и в дальнейшем они проявляются в других частях.
3. Одновременно построены локальные неоднородности по вертикальному разрезу на меридиане сильного Кеминского землетрясения ( $K_R = 17.8$ ,  $M = 8.2$ ,  $I_0 = 10-11$  баллов,  $h = 25$  км,  $\varphi = 42.90^\circ$ ,  $\lambda = 76.90^\circ$ ) по параметрам:  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , коэффициента Пуассона, плотности  $\rho$ , модуля сжатия  $K$ , модуля сдвига  $\mu$ . Выделены своеобразные складки и высококонтрастные границы неоднородностей на разных горизонтах земной коры. Отмечены ранние и поздние проявления - «рождения» локальных неоднородностей, которые характеризуют процесс динамической локальной скоростной неоднородности литосферы Тянь-Шаня.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Roecker S.W., Sabitova T. M., Vinnik L.P. et al. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien Shan // J. Geophys. Res. - 1993. - V. 98. - N. B9. - P.15779-15795.
2. Ghose S., Humburger M., Virieux J. Three-dimensional velocity structure and earthquake locations beneath the northern Tien Shan of Kyrgyzstan, Central Asia // J. Geophys. Res. - 1998. - V. B2. - P.2725-2748.

3. Adamova A.A., Sabitova T.M. Velocity structure beneath Tien Shan inferred from P-and S-wave by travel time tomography //Newsletter. European Geophysical Society. Number 78, Nice, March 2001.
4. Адамова А.А., Сабитова Т.М. Трёхмерная скоростная модель земной коры Тянь-Шаня //Физика Земли. -2004. -№5. –С.58-67.
5. Сайипбекова А.М. Сейсмотомографическая модель и современная геодинамика литосферы Тянь-Шаня //Отв.ред. В.И.Шацкилов. Ош: Билим, 2003. -216 с.
6. Сабитова Т.М. и др. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. //Отв.ред. Бакиров А.Б. Бишкек: Илим, 2006. -116 с.
7. Omuralieva A., Nakajima J., Hasegawa A. Three-dimensional seismic velocity structure of the crust beneath the central Tien Shan, Kyrgyzstan: Implications for large- and small-scale mountain building //Tectonophysics. -2009. N.465(1). –P.30-44.
8. Zhao D., Hasegawa A., Horiuchi S. Tomographic Imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan //J. Geophys Res. -1992. –V.97. NO. B13 –P.19909-19928.
9. Omuraliev M., Omuralieva A. Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia. Bishkek: Ilim, 2004. -166 p.
10. Щелочков Г.Г., Брагин В.Д., Рыбин А.К. и др. Трансект «MANAS»: первые результаты обработки и интерпретации данных сейсмических зондирований Центрального Тянь-Шаня //Сборник материалов четвёртого международного симпозиума 15-20 июня 2008 года «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. Выпуск 4. -2009. - С.59-67.
11. Отчёты о научно-производственной деятельности Центра обработки данных Института сейсмологии НАН КР.
12. Lahr, J.C., 1999, revised 2012, HYPOELLIPSE: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern: U.S. Geological Survey Open-File Report 99–23, version 1.1, 119 p. and software, available at <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023/>.
13. Абдрахматов К.Е., Омуралиев М., Омуралиева А. Распределение флюидов, температуры в зонах Центрального Тянь-Шаня и подготовка сильных землетрясений, 2015, Бишкек: «Триада Принт», 206 с.
14. Christensen N.I., Mooney W.D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view //J. Geophys Res. -1995. –V.100. NO. B7 –P.9761-9788.
15. Christensen N.I. Poisson's ration and crustal seismology //J. Geophys Res. -1996. –V.101. NO. B2 –P.3139-3156.

*Рецензент: д.ф.-м.н. Погребной В.Н.*