

УДК 550.34

Сайипбекова Анара Мурадовна

д.физ.- мат. наук, профессор

Ошский государственный университет

Сайипбекова Анара Мурадовна

физ.мат.и.д., профессор

Ош мамлекеттик университети

Saiipbekova Anara Muradovna

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Osh State University

Макамбаева Жийдегул Абдимиталиповна

Преподаватель

Ошский государственный университет

Макамбаева Жийдегул Абдимиталиповна

окутуучу

Ош мамлекеттик университети

Makambaeva Jidegul Abdimalipovna

Lecturer

Osh State University

Саипбекова Сезим Эрмековна

магистрант

Ошский государственный университет

Саипбекова Сезим Эрмековна

магистрант

Ош мамлекеттик университети

Saipbekova Sezim Ermekovna

Undergraduate

Osh State University

Иманалиева Дарика Копшоковна

Главный специалист

Государственное агентство по интеллектуальной
собственности и инноваций при Кабинете Министров КР**Иманалиева Дарика Копшоковна**

башкы адис

Кыргыз Республикасынын Министрлер Кабинетине караштуу
Интеллектуалдык менчик жана инновациялар мамлекеттик агенттиги**Imanalieva Darika Kopshokovna**

Chief specialist

State Agency for Intellectual Property and innovations under the Cabinet of
Ministers of the Kyrgyz Republic

СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ТЕРРИТОРИИ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Аннотация. В работе получены сейсмотомографические модели верхней мантии территории Кыргызской Республики и прилегающих территорий по данным сильных удаленных землетрясений. Скоростные неоднородности получены по трем разным алгоритмам сейсмотомографии. Проанализированы особенности строения самой нижней части коры и верхней мантии Кыргызской части Тянь-Шаня и прилегающих территорий.

Ключевые слова: записи телесейсмических землетрясений, точность измерений, аномалии Р волны, верхняя мантия, скоростная модель, строение верхней мантии

СЕЙСМОГРАММАДАГЫ ЖАЗУУЛАРДЫН НЕГИЗИНДЕ АНЫКТАЛГАН КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН АЙМАГЫНЫН ЖОГОРКУ МАНТИЯСЫНЫН ТҮЗҮЛҮШҮ

Аннотация. Жумуштун жүрүшүндө аймактын жогорку мантиясынын сейсмикалык томографиялык моделдери алынды. Алыскы аралыктан жайгашкан жер титирөөлөрдөн сейсмограммалык жазуулард колдонуу менен Кыргыз Республикасы жана ага чектеш аймактардын мантиясынын ылдамдыктын бир аймактан экинчи аймакка бирдей эместиги үч түрдүү алгоритмди колдонуу менен алынган сейсмикалык томографиялык моделдер алынды. Эң төмөнкү бөлүгүнүн структуралык өзгөчөлүктөрү талданат. Тянь-Шань тоо кыркасынын Кыргызтан бөлүгүнүн жана ага чектеш аймактардын кыртышынын жогорку мантиясында Р толкунун тароо ылдамдыктары аныкталган.

Негизги сөздөр: телесейсмикалык жер титирөөлөрдү жазуу, өлчөө тактыгы, Р толкунунун аномалиялары, мантия, ылдамдык модели, жогорку мантиянын түзүлүшү

STRUCTURE OF THE UPPER MANTLE OF THE TERRITORY OF THE KYRGYZ REPUBLIC ACCORDING TO SEISMOLOGICAL DATA

Abstract. The article was received obtained seismic tomographic models of the upper mantle of the territory Kyrgyz Republic and adjacent territories according to data from strong teleseismic earthquakes. Velocity inhomogeneities were obtained using three different algorithms seismic tomography. The structural features of the lowest part are analyzed crust and upper mantle of the Kyrgyz part of the Tien Shan and adjacent territories.

Key words: recordings of teleseismic earthquakes, measurement accuracy, anomaly of the P waves, upper mantle, velocity model, structure of upper mantle

Геологические методы изучения земной коры основаны на результатах непосредственного изучения толщ горных пород в обнажениях, горных выработках, например, скважинах шахтах и штольнях. Следует отметить в распоряжении исследователей имеется весь арсенал методов исследования состава и строения, что определяет высокую степень точности, достоверности и детальности результатов. Но, возможности геологических методов при изучении глубин Земли ограничены – самая глубокая в мире скважина Кольская сверхглубокая в Российской Федерации имеет глубину лишь -12 262 метров.

Второе известное бурение с борта американского исследовательского судна «Гломар Челленджер» достигнуто при бурении океанического дна примерно -1 500 метров. Исходя из вышеизложенного можем сделать вывод по геологическим методам, непосредственному изучению доступны глубины, примерно 0,18 % радиуса планеты. Общие геолого – геофизические методы изучению внутреннего строения земной коры базируются вышеуказанным источникам, то есть эти породы из глубины можно прощупать и сохранены образцы извлеченных пород.

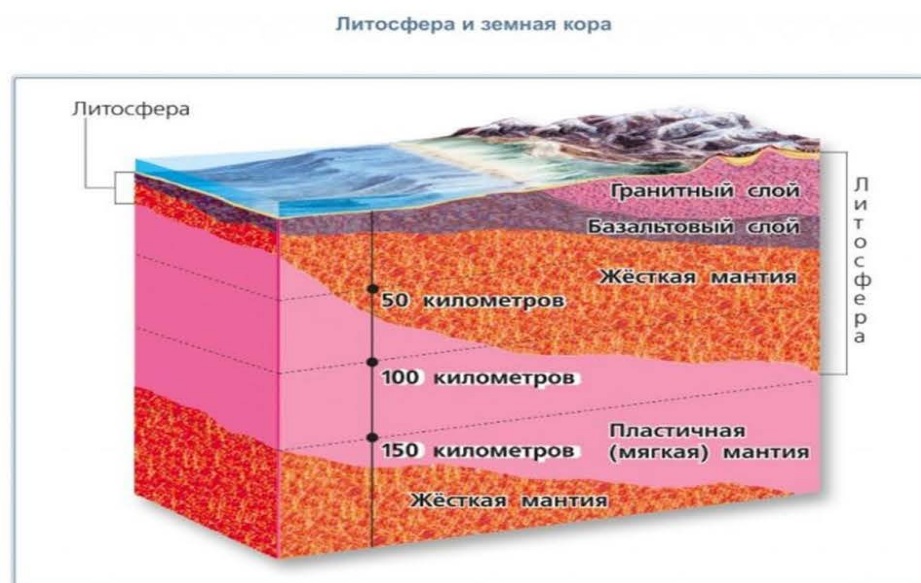


Рис. 1 Типичная классическая модель земной коры и мантии для океанической и горной местностях Земли.

Кроме выше указанных специальных исследований, основой сейсмотомографических построений являются многочисленные сейсморазведочные и сейсмологические экспериментальные данные. В данной работе мы будем делать акцент на строения верхней мантии территории Кыргызской Республики и прилегающих районов.

Подбор инструментальных данных. В основу построения моделей внутреннего строения Земли, особенно нижней коры и верхней мантии положены результаты сейсмических исследований, опирающиеся на данные о скоростных свойств нижней коры и мантии. Скорости волн определяются по данным распространения сейсмических волн. В данной работе мы приводим скоростные модели нижней части коры и верхней мантии полученных по данным телсейсмических землетрясений ($30^{\circ} < \Delta < 87^{\circ}$).

Эволюция методик трехмерная скоростная модель верхней мантии по телесеismicким землетрясениям. Под удаленными или телесеismicкими землетрясениями обычно подразумевают землетрясения, удаленные от регистрирующих станций на расстояния более 2000 км. Удаленные сильные землетрясения на сейсмограммах имеют как правило четкое вступление Р-продольной волны. Они случаются на планете примерно раз в две недели. Большая их часть приходится на дно океанов, и поэтому не сопровождается катастрофическими последствиями. При анализе многочисленных сейсмограммы убедились, когда гипоцентры удаленных землетрясений находятся на глубинах более 10 км, именно такие землетрясения имеют четкую запись. Для удобства локализации мы использовали землетрясения с эпицентрального расстояния больше 30 градусов ($1^0=111,13$ км, $30 \times 111,13=3\ 334$ км). Лучи сейсмических волн выше таких расстояниях землетрясений пересекают исследуемую территорию в пределах верхней мантии приблизительно под углом 90^0 , что упрощает локализацию неоднородных объектов. Всего использованы данные 60 станций Средней Азии и Китая. Большинство землетрясений было записано на всех станциях сети. Качество материала весьма высокое. Стандартная ошибка в исходных данных принималась равной 0,2 с.

Характерной особенностью полученных данных является разброс значений $\bar{\delta}t_{ik}$ со среднеквадратичным значением около 0.09-0.16 с для Р-волн (распределение невязок Р-волн-нормальное) и около 0.3-0.4 для S-волн. Величина аномалий значительно превосходит случайную погрешность измерений. Мы приняли, что она состоит из осадочного слоя (мощность h_0 , скорость V_0) и консолидированного слоя (мощность h_k , скорость V_k). При вычислении поправки время пробега приводится к стандартной глубине h_m , на которой находится выровненная поверхность мантии. Поправка оценивается по формуле

$$\Delta t_i = \frac{h_0}{V_0 \cdot \cos i_0} + \frac{h_k}{V_k \cdot \cos i_k} - \frac{(h_0 + h_k + h_m)}{V_m \cdot \cos i_m} \quad (1)$$

где i_0 , i_k , i_m - соответствующие углы падения.

Для Р - волн величина V_m принята равной 8.1 км/с, для S - волн - 4.7 км/с. Значения V_0 и V_k приняты равными 4,0; 6,3 км/с для волн Р и 2,3; 3,6 км/с - для волн S. Для ряда идентичных азимутальных секторов и 17 станций Тянь-Шаня вычислены величины δt_p и δt_s . Регрессионный анализ показал, что соотношение δt_s и δt_p можно выразить в виде:

$$\delta t_s = 2,87\delta t_p - 0,17. \quad (2)$$

Для проверки значимости полученного уравнения регрессии использован F - критерий Фишера. Вычислена остаточная дисперсия

$$\sigma_s^2 / \text{ост} = \frac{\sum_{i=1}^n (\delta t_s - \hat{\delta t}_s)^2}{n-2} \quad (3)$$

и получено, что

$$\hat{F} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 / \text{ост}} = \frac{2,56}{1,86} = 1,37 > F^{\text{таб}} \quad (4)$$

при доверительной вероятности 95%. Наше уравнение регрессии статистически значимо описывает результаты наблюдений. Определены соотношения аномалий времени пробега для Р и S волн. Тесная корреляция (коэффициент корреляции 0.82 ± 0.03) δt_s и δt_p позволяет в дальнейшем ограничиться построением скоростных моделей только для Р - волн .

Первый вариант карты скоростных неоднородностей верхней мантии построенный по данным телесейсмических землетрясений.

Экспериментальный материал: В расчетах использованные материалы можно представить как:

- а) Временной интервал с 1965 по 1983 гг.,
- б) Магнитуда $M > 5.7$,
- в) Глубина очага от 0 до 670 км,
- г) Эпицентральное расстояние $30^\circ < \Delta < 87^\circ$,
- д) Количество станций – 48,
- е) Количество событий – 394.

Скоростная модель верхней мантии Тянь-Шаня (с поправкой за неоднородность коры) представлена средним сечением на глубине 100 км [2, 3,5]

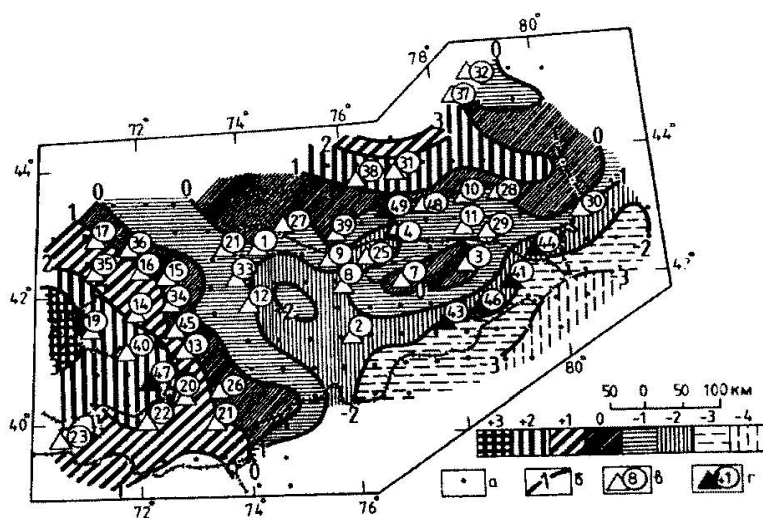


Рис. 1. Карта латеральных скоростных неоднородностей верхней мантии Тянь-Шаня для глубины 100 км, составленный авторами по данным 48 сейсмических станций, Первая шкала показывает отклонение скорости от среднего, а) точки осреднения, (б) цифры в изолиниях показывают значение δV в процентах от V_0 , в), г) сейсмические станции.

Второй вариант трехмерной скоростной модели верхней мантии Памира и Тянь-Шаня построен по данным 22 сейсмических станций Средней Азии.

Экспериментальный материал. В расчетах использованные материалы можно представить как:

- а) Временной интервал с 1965 по 1988 гг.,
- б) Магнитуда $M > 5.7$,
- в) Глубина очага от 0 до 670 км,
- г) Эпицентральное расстояние $30^{\circ} < \Delta < 87^{\circ}$,
- д) Количество станций – 22,
- е) Количество событий – 495.

В данном этапе наших исследований использованы записи 495 телесеизмических событий. При построении модели мантии Памира мощность коры варьирует в пределах от 40 до 75 км; поправки за неоднородность коры достигают 0,5 с., а это важный момент.

Получен два варианта скоростной модели верхней мантии для Памира и Тянь-Шаня, одна из которых построена без поправок за неоднородность коры, другая - с учетом неоднородности коры [4,6]

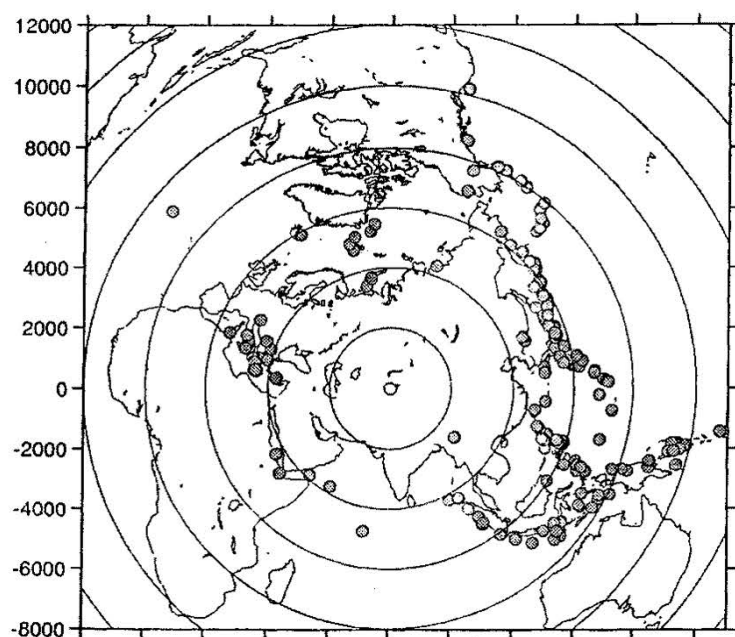


Рис.2. Распределение далеких землетрясений (кружочки - Earthquakes Used From Central Asia's New Data Set)

Записи землетрясений из западного сектора в этом диапазоне эпицентральных расстояний сравнительно малочисленны и не имеют четких вступлений. Из этого сектора Средиземноморского сейсмического пояса из 56 землетрясений с магнитудой $M > 5.6$ выбрано 32 землетрясения. Для обеспечения полного азимутального охвата использованы записи РКР, РКІКР-волн в диапазоне эпицентральных расстояний 120° - 140° и 149° - 165° . Так использованы записи около 120 землетрясений с магнитудой $M > 6.3$ из таких сейсмоактивных районов, как Перу, Чили, Панама, острова Галапагос, район подводных хребтов южнее Африки и южной части Тихого океана.

Данные о землетрясениях взяты из бюллетеня Международного сейсмологического центра (BISC). В пределах исследуемой части Тянь-Шаня станции расположены в среднем на расстоянии порядка нескольких десятков километров друг от друга, минимальное расстояние 24 км. Всего использованы данные 60 станций Средней Азии и Китая. Большинство станций оборудовано однотипной аппаратурой СКМ-3 с гальванометром ГБ-4, максимальное увеличение канала обычно составляет 10^{**4} - 10^{**5} на частоте около 1 гц. Скорость развертки на большинстве станций 120 мм/мин. Сейсмограммы трехкомпонентной аппаратуры типа СК и СКД с максимальным увеличением около 10 тыс. и разверткой 120 мм/мин использовались для определения времени вступления Р-волн. Большинство землетрясений было записано на всех станциях сети. Качество материала весьма высокое. Стандартная ошибка в исходных данных принималась равной 0,2 с. При практических измерениях время вступления для каждой станции определялось путем визуальной корреляции формы колебаний на однотипных каналах различных станций. Профессионалам сейсмологам известно, примеры записи волны Р на ряде станций Тянь-Шаня, свидетельствующий об отличной повторяемости характеристик фаз записи.

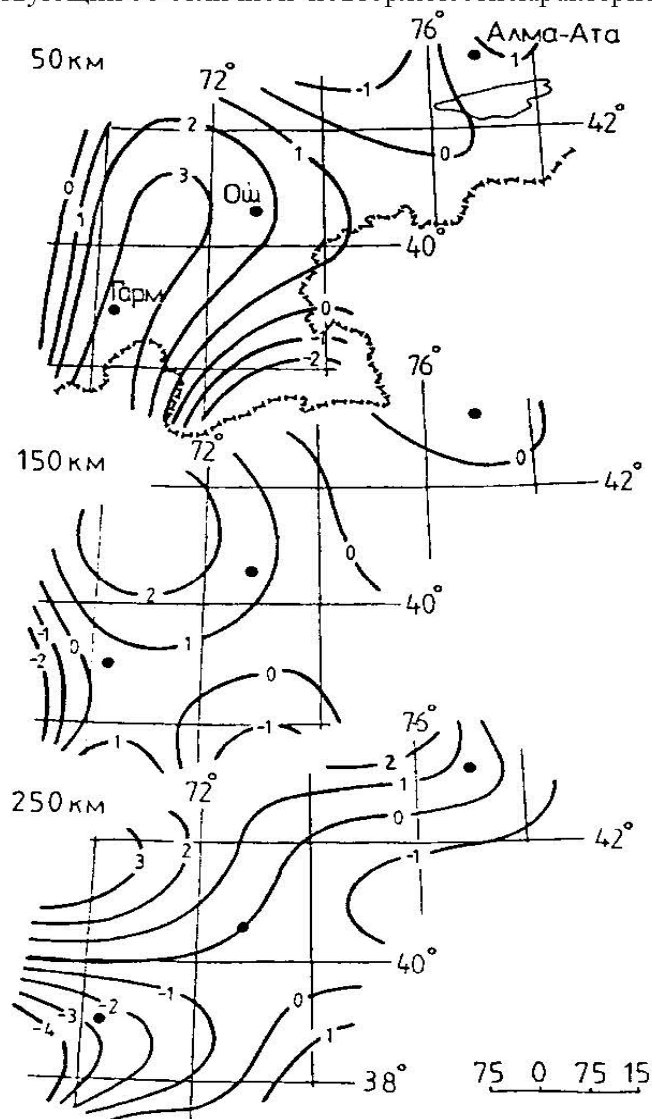


Рис.3. Скоростные неоднородности тектоносферы Тянь-Шаня (без поправок на неоднородность коры) на глубинах 50, 150 и 250 км. Цифры на изолиниях показывают значение ΔV в процентах от V_0 .

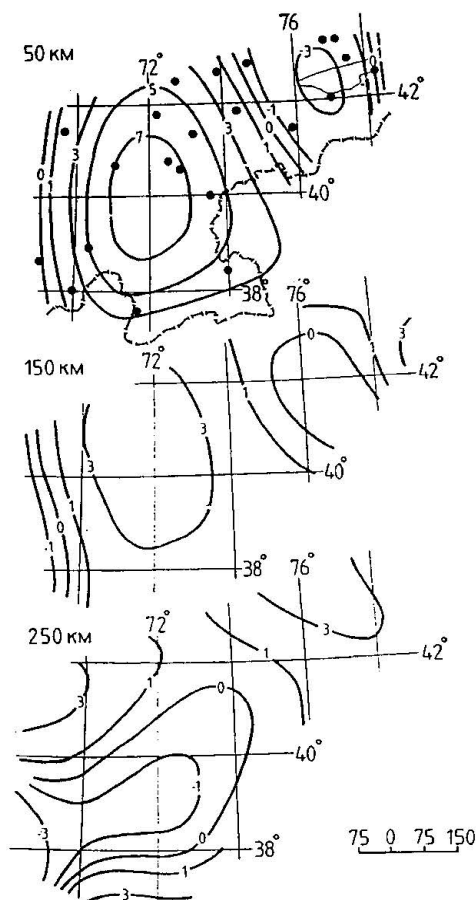


Рис. 4. Скоростные неоднородности литосферы для района Памира и Тянь-Шаня с поправками на неоднородность коры на глубинах 50, 150 и 250 км. Цифры на изолиниях показывают значение δV в процентах от V_0 .

Анализ затухания упругих волн, возникающих при промежуточных Памиро-Гиндукушских землетрясениях и распространяющихся в верхнем слое мантии Памира и Западного Тянь-Шаня, позволил сделать вывод об очень высокой добротности мантии этого района [7]. Таким образом, наши результаты построения трехмерной скоростной модели мантии этого района и определения добротности находятся в очень хорошем взаимном соответствии.

На нижнем срезе модели Памира и Тянь-Шаня выделяется субширотная зона повышенной скорости на глубинах 200-300 км. Ранее высокоскоростной характер фокальной зоны был отмечен в работе [1]. Однако результаты исследований, выполненных по данным наблюдения промежуточных землетрясений на Гиндукуше и Южном Памире, свидетельствуют о низкоскоростном характере фокальной зоны [8,13]. По данным американского сейсмолога S.W.Roesker [13] в нижней части фокальной зоны установлено повышение скорости. Таким образом, результаты исследований мантии фокальной зоны различными методами оказались в серьезном противоречии. После тщательного отбора наблюдаемых записей и подбора правильной параметризации при решении обратной задачи, в наших исследованиях оно устранено, т.к. в нашей трехмерной модели Тянь-Шаня и Памира повышение скорости в фокальной зоне наблюдается только на нижнем срезе модели, т.е. на глубинах 200-300 км.

Пониженная скорость в фокальной зоне, по данным указанных выше работ, отмечается на глубинах менее 200 км, что не противоречит нашей трехмерной модели скоростной модели верхней мантии. В наши данные показывают, только фокальная зона глубоких землетрясений на нижнем срезе скоростной модели верхней мантии, точнее на глубинах 200-300 км характеризуется повышенными скоростями [4,6].

Третий вариант. Блоковая трехмерная скоростная модель верхней мантии построена по программе *SPHYFIT90* (программа S.Roecker,1990). Для расчетов поля скоростей верхней мантии выбраны данные времен пробега удаленных 495 землетрясений. Скоростная модель верхней мантии представлена в виде трех параллельных слоев, содержащих блоки для интервалов глубин 50-75 км, 75-150 км, 150-300 км [10, 11,12, 14].

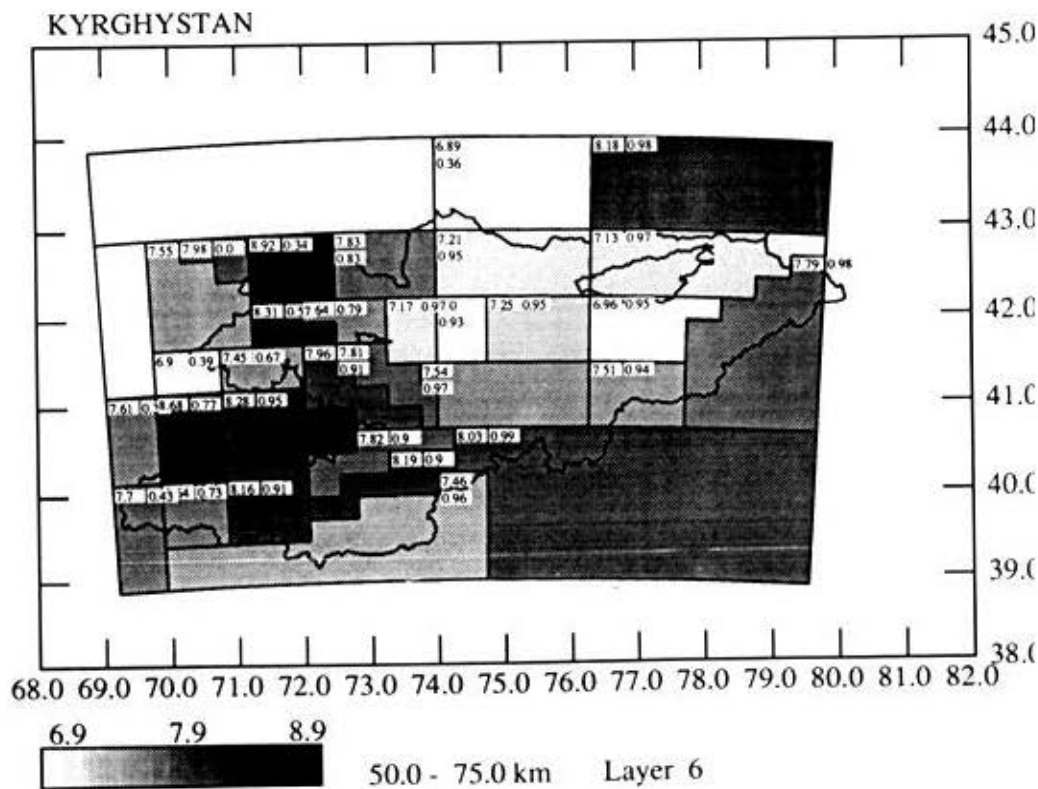


Рис. 5. Скоростное поле в интервале глубин от 50 до 75 км, первая цифра V_p , вторая цифра разрешение.

Сравнивая эти скоростные модели, построенные по одним и тем же экспериментальным данным с применением двух эффективных алгоритмов алгебраической инверсии, необходимо отметить, что территория, расположенная к северо-востоку от Таласо-Ферганского разлома, в интервале глубин 50-75 км характеризуется низкими и средними скоростями (от 7.2-8.0 км/с), на западе значения скоростей варьируют от 8.0 до 8.9 км/с (в пределах территории Кыргызстана). В нижней части коры и в подкоревой части верхней мантии в районе Ферганской впадины скорость значительно повышена (8.7 км/с) по сравнению с горным обрамлением.

В слое (50-75 км) в районе Ферганской впадины скорость выше (8,68 км/с), чем в ее горном обрамлении (7.5 км/с - в районе Чаткальского хребта, в районе горного Равата, а в районе хребта Кичи Алая -7.8 км/с). Самые низкие скорости 6,98 км/с (разрешение-0.95) отмечены в районе Каджы-Сая. По данным ГСЗ и региональных профилей [9] по скоростному уровню $V_p=7,2$ км/с район Каджы-Сая южнее прослеживается более в глубинах 70 км.

В целом Северный и Срединный Тянь-Шань в пределах территории Кыргызстана характеризуется со скоростью 7.0-7.6 км/с, а в Южном Тянь-Шане в пределах Кокшаал-Тоо значение $V_p=7.6 - 8.0$ км/с. Если в общих чертах сравнить скоростные модели верхней мантии нами рассчитанные с применением двух алгоритмов, в последних полученных данным нам удалось выявить глубинную градацию этих скоростных аномалий.

Заключение

1. Проанализированы времена пробега продольных волн далеких землетрясений из большого числа эпицентральных областей.
2. Оценено соотношение аномалий времени пробега Р и S волн.
3. Построена трехмерная скоростная модель мантии Тянь-Шаня; Памира и Тянь-Шаня до глубины 300 км. В целом, особенностью скоростной модели верхней мантии Тянь-Шаня является низкая скорость в его восточной и относительно высокая - в западной частях, но скорости верхней мантии Западного Тянь-Шаня дифференцированы. В нижней части коры и в подкоровой части верхней мантии в районе Ферганской впадины скорость значительно повышена (8.7 км/с) по сравнению с горным обрамлением.
4. Установлено, что Памиро - Гиндукушская фокальная зона промежуточных землетрясений отличается повышенной скоростью от окружающей среды только на глубинах 200-300 км.

Литература

1. Винник Л.П., Лукк А.А., Мирзокурбонев М. Количественный анализ скоростных неоднородностей верхней мантии Памиро-Гиндукуша. // Изв АН СССР, Физика Земли. 1978. № 5. с. 3 - 16.
2. Винник Л.П., Юдахин Ф.Н., Сайипбекова А.М. Глубинное строение и геодинамика Тянь-Шаня.//Докл. АН СССР. Москва: 1983. т.268. №1. С.143-150.
3. Vinnik L.P., Saipbekova A.M. Structure of lithosphere and asthenosphere of the Tien-Shan. // *Annales geophysicae*. 1984. Vol.2. №6. p. 621-626.
4. Бурмакова Ю.А., Винник Л.П., Сайипбекова А.М. и др. Трехмерная скоростная модель тектоносферы Памира и Тянь-Шаня. // Докл. АН СССР. Москва: 1987. №1. С.56-60.
5. Сайипбекова А.М. Горизонтальные скоростные неоднородности верхней мантии Тянь-Шаня и сопредельных геоструктур. // В мон. Литосфера Тянь-Шаня, под ред. И.Е. Губина, АН СССР, ИС АН Киргизской ССР, - Москва: Наука, 1986. С.83-89.
6. Сайипбекова А.М. Трехмерная скоростная модель верхней мантии Памира и Тянь-Шаня. // В мон. Типовые геолого-геофизические модели сейсмичных и асейсмичных районов. Бишкек: Илим, 1993, с.23-42.

7. Молнар П., Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. 1976. Спектральный состав Памиро-Гиндукушских землетрясений: свидетельство существования высокодобротной зоны в верхней мантии //Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений. Т.1, Книга 1. Душанбе, 1976, с.140-156.
8. Эргешев Т.Э., Каримова Г.Г., Рубайло В.И. 1976. Профильные сейсмические наблюдения. // Литосферы Памира и Тянь-Шаня. Ташкент: Фан, 1982, с.113-144.
9. Шацкилов В.И., Сайипбекова А.М., Грибанов Ю.Е. Изучение глубинного строения Тянь-Шаня по материалам региональной сейсмологии. // Journal Inland Earthquake. Urumqi: 1995. Vol.9. №4. С.374-381.
10. Сайипбекова А.М., Искандерова А.М., Павлуниин В.Е. Физико-математические аспекты решения задач сейсмотомографии. //Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы механики и прикладной математики» посвященной памяти профессора И. Франкля. Бишкек, 1996. Том 1, Механика, С.110-115.
11. Сайипбекова А.М., Блинов Г.И., Павлуниин В.Е. и др. 1996. Томографические модели литосферы Тянь-Шаня. // «Проблемы и перспективы развития науки и техники в области механики, геофизики, нефти, газа, энергетики Казахстана»: Тез. межд. научно.-технической конференции 22-24 мая 1996. Актау: 1996. С.40-42.
12. Сайипбекова А.М., Иманалиева Д.К., Макамбаева Ж.А., Молдоярлова Ж.Б. 2023. Анализ математических основ решения обратной кинематической задачи сейсмики// Вестник ИС НАН КР, 2023, №2, С. 82-92 .
13. Roecker S.W.1982. Velocity structure of the Pamir-Hindukush region, possible evidence of subducted crust.//Journal Geophys.Res.vol.87, №B2, p.945-959.
14. Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L. 1993. Tree-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien Shan // JGR. V.98. N.B9. P. 15,779-15,795.