

УДК. 550.34; 551.1

Багманова Н.Х., Миркин Е.Л.
Институт сейсмологии НАН КР,
г. Бишкек, Кыргызстан

СЕЙСМИЧНОСТЬ И СКОРОСТНАЯ СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮЖНО-ФЕРГАНСКОЙ ЗОНЫ

Аннотация. Представлены исследования по сейсмичности и скоростных свойств среды формирования очагов землетрясений Южно-Ферганской зоны, отмечены особенности скоростного строения земной коры и верхней мантии.

Ключевые слова: сильные землетрясения, земная кора, мантия, трёхмерная скоростная модель, зоны ВОЗ.

СЕЙСМИКАСЫ ЖАНА ЖЕР КЫРТЫШЫШЫН ЫЛДАМДАНУУСУНУН КАСИЕТИ ТУШТУК-ФЕРГАНА ЗОНАСЫ

Кыскача мазмуну. Түштүк Фергана зонасында жер титирөө очокторунун түзүлүш чөйрөсүнүн сейсмикалык жана ылдамдык касиеттери боюнча иликтөөлөр келтирилген, жер кыртышынын жана жогорку мантиянын ылдамдык структурасынын өзгөчөлүктөрү көрсөтүлгөн.

Негизги сөздөр: күчтүү жер титирөөлөр, жер кыртышы, мантия, үч өлчөмдүү модель, жер титирөө очокторунун пайда болуу аймактары.

SEISMICITY AND VELOCITY STRUCTURE OF EARTH CRUST AND UPPER MANTLE OF SOUTH-FERGANA ZONE

Abstract. Seismicity and velocity properties of the area of formation of earthquake zones of the South Fergana region are investigated; features of velocity structure of earth crust and upper mantle are indicated.

Keywords: strong earthquake, earth crust, upper mantle, three-dimensional velocity model, zone of possible earthquake.

Исследование скоростных свойств среды формирования очагов землетрясений в Южно-Ферганской зоне системы активных разломов [1] несомненно представляет интерес. Южно-Ферганская зона (рисунок 1) - область, оконтуренная Южно-Наукатским (Ю-Н), Тарским (Т), Южно-Ферганским (Ю-Ф), Таласо-Ферганским (Т-Ф) краевыми разломами, в пределах которой произошли такие сильные землетрясения, как Кырккольское (1907 г., $M_{LH}=5.8$), Ферганское (1822 г., $M_{LH}=6.2$), Куршабские (1924 г., $M_{LH}=6.4$, $M_{LH}=6.5$), Маркайское (1962 г., $M_{LH}=5.5$), Кадамжайское (1974 г., $M_{LH}=5.0$), Исфара-Баткенское (1977 г., $M_{LH}=6.3$), Чимионское (1982 г., $M_{LH}=5.8$), Гульчинское (2008 г., $M_{LH}=5.4$), Канское (2011г., $M_{LH}=5.6$), Гульчинское (2015г., $M_{LH}=5.6$).

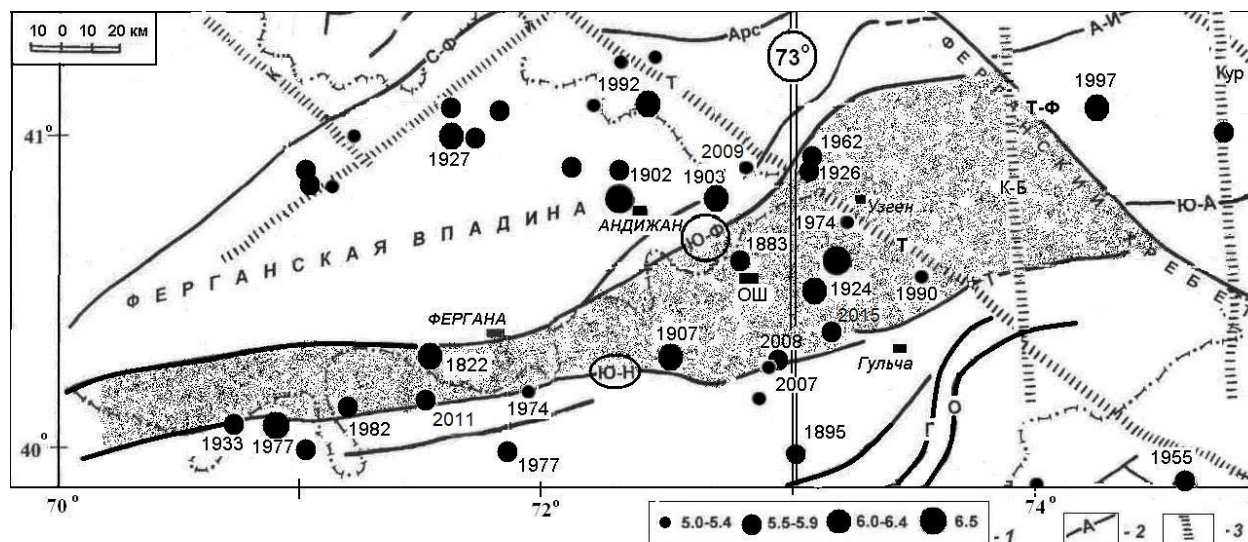


Рисунок 1. Район исследования (затемнённая область). 1-эпицентры землетрясений с указанием значения магнитуды ($M_{LH} \geq 5,0$) и даты (год); 2- краевые разломы [3]: Ю-Ф – Южно-Ферганский, Ю-Н – Южно-Наукатский, Т- Тарский, С-Ф – Северо-Ферганский, Т-Ф – Таласо-Ферганский, Арс – Арсланбобский; 3- секущие линеаментные зоны [1]: Т- Тарская, К-Б- Каракуль-Балхашская, Кур – Куртская.

На рисунке 1 вынесены эпицентры всех сильных землетрясений ($M_{LH} \geq 5,0$), произошедших в области, ограниченной координатами: $\varphi = 40.0^\circ - 41.3^\circ$ с.ш., $\lambda = 70^\circ - 75^\circ$ в.д., с древнейших времен и по настоящее время [2]. Отмечается приуроченность ряда сильных землетрясений к Южно-Наукатской разломной зоне (1933, 1974, 1977, 1982, 1990, 2007, 2008, 2011, 2015). С Южно-Ферганской разломной зоной, в основном, связаны исторические землетрясения, т.е. те события, которые произошли в 1822, 1883, 1903, 1926 гг. В восточной части исследуемой области, отделяемой Тарской секущей линеаментной зоной (#Т), землетрясения с $M = 5.0 - 6.5$ не происходили за всё время наблюдений. Рассмотрим пространственное распределение землетрясений более слабого энергетического уровня за двадцатилетний период времени. На рисунке 2 обозначены эпицентры землетрясений, произошедшие в районе исследования с 2000 по 2020 гг. с энергетическим классом $K = \lg E$ Дж.: рисунок 2а - $K \geq 10.0$ ($M_{LH} \geq 3.3$), рисунок 2б - $K = 8.0 - 9.0$ ($M_{LH} = 2.2 - 2.8$). Произшедшие за этот период времени землетрясения с $K = 10.0 - 12.0$ ($M_{LH} = 3.3 - 4.4$) приурочены к Южно-Наукатской и Южно-Ферганской разломным зонам и зоне Ошских землетрясений 1924 года, а также к зоне, западнее Таласо-Ферганского разлома. В большинстве случаев многочисленные слабые землетрясения с $K = 8.0 - 9.0$ ($M_{LH} = 2.2 - 2.8$) также приурочены к этим разломным зонам. Отмечаемая в восточной части область отсутствия землетрясения с $M_{LH} = 5.0 - 6.5$ (отделяемая Тарской секущей линеаментной зоной (#Т)) характеризуется малочисленностью землетрясений с $K \geq 12.0$ ($M_{LH} \geq 4.4$) – за двадцать лет произошло только два события с $K = 12.0$ ($M_{LH} = 4.4$), 24 события - с $K = 10.0 - 11.0$ ($M_{LH} = 3.3 - 3.9$), более многочисленны землетрясения с $K = 8.0 - 9.0$ ($M_{LH} = 2.2 - 2.8$). При этом также наблюдается меньшая по размерам область отсутствия землетрясений с $K \geq 10.0$ ($M_{LH} \geq 3.3$) за двадцатилетний период времени (2000-2020 гг.).

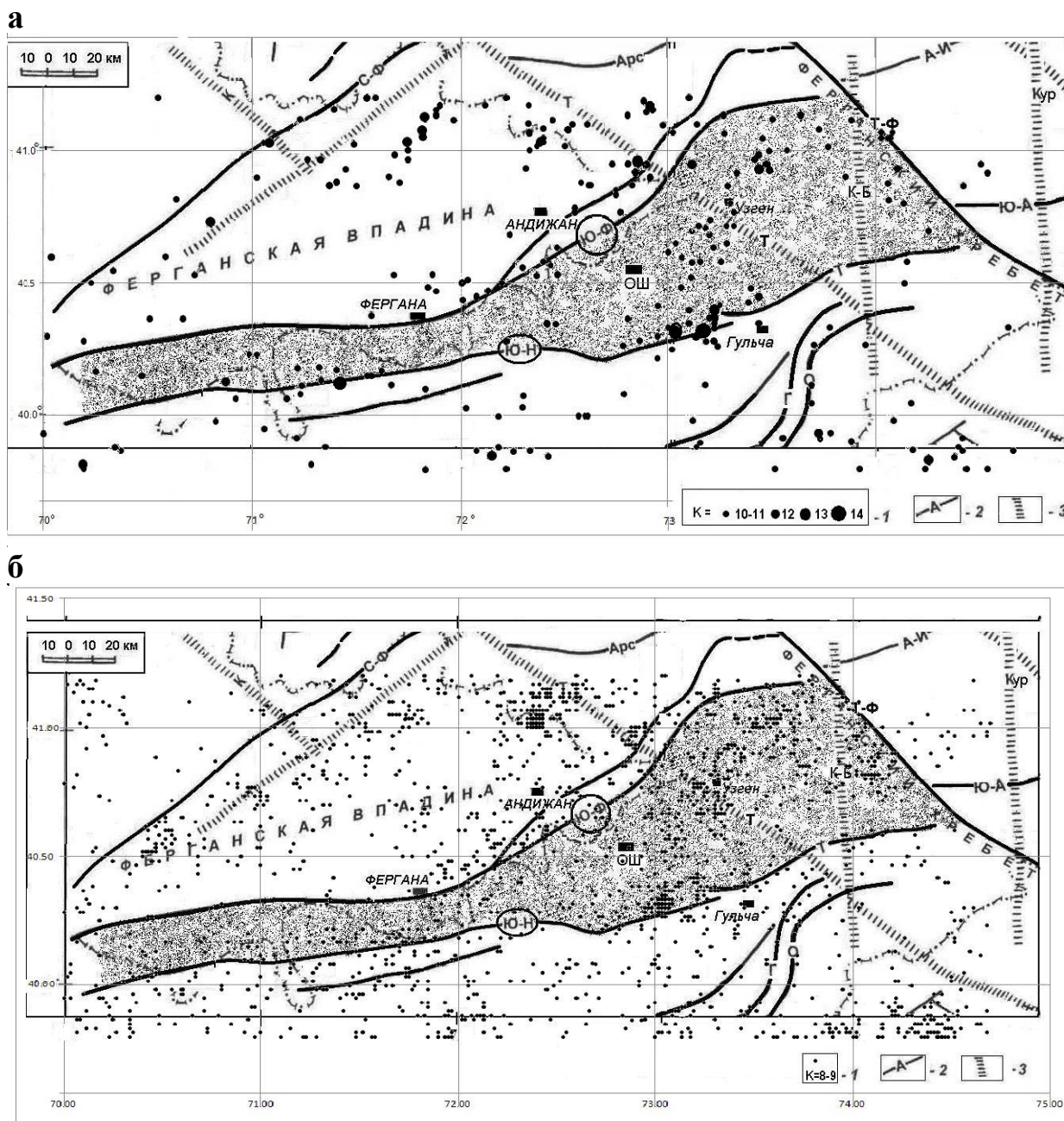


Рисунок 2. Эпицентры землетрясений, произошедших в районе исследования с 2000 г. по 2020 г. 1-энергетический класс $K = \lg E$ Дж (а - $K \geq 10.0$, б - $K = 8.0-9.0$); 2- краевые разломы [1]; 3- секущие линейamentные зоны [1] (см. рисунок 1).

Скоростные свойства земной коры и верхней мантии района исследования были рассмотрены на основе трёхмерной скоростной модели Тянь-Шаня, полученной в Кыргызстане Сабитовой Т.М. и Адамовой А.А. [3, 4], результаты её интерпретации представлены в настоящей работе. Сейсмотомографические профили, проведённые вдоль простирания Южно-Наукатского (Ю-Ф) и Южно-Ферганского (Ю-Н) разломов, построены для двух глубинных интервалов: (а) – $H = 0-70$ км - земная кора, (б) – $H = 65-225$ км – верхняя мантия и представлены на рисунке 3 и рисунке 4. Рассмотрим скоростные особенности среды вдоль Южно-Наукатского разлома (рисунок 3). Очаги землетрясений 1933, 1977, 1982, 2011 годов приурочены к локальному объёму повышенной скорости Р-волн ($V_p = 7.0 - 7.4$ км/с) на фоне доминирующих скоростей ($V_p = 6.1 - 6.2$ км/с) на глубинах 15-25 км. Непосредственно под высокоскоростным

объёмом на глубинах 35-45 км расположена низкоскоростная область $V_p = 6.6$ км/с.

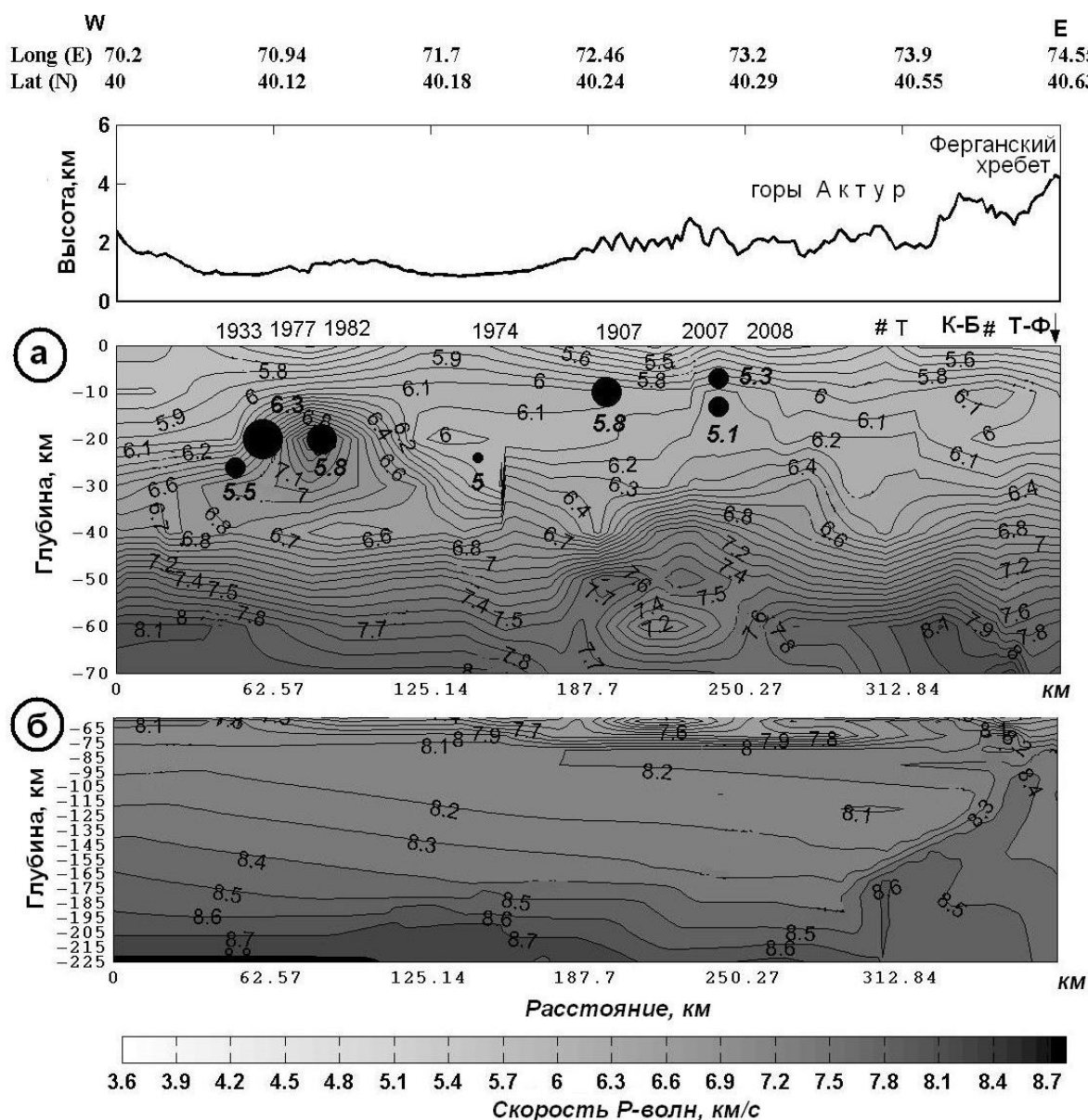


Рисунок 3. Скоростной разрез по Р-волнам вдоль Южно-Наукатского разлома: **а** – земная кора, **б** – верхняя мантия (кругами обозначены гипоцентры землетрясений с указанием магнитуды и даты, Т-Ф – Таласо-Ферганский разлом, #Т - Тарская, #К-Б - Каракуль-Балхашская секущие линейментные зоны [1]).

Очаги землетрясений 1907, 2008, 2015 годов приурочены к зоне со скоростями ($V_p = 6.1-6.2$ км/с) на глубинах 10-20 км, ниже которой отмечается высокоскоростное тело ($V_p = 7.5-7.7$ км/с) на глубинах 45-55 км, под которым наблюдается уменьшение скорости (до $V_p = 7.2-7.4$ км/с) на глубинах 55-65 км (волноводная зона). Обращает на себя внимание отсутствие землетрясений с $M = 5.0 - 6.5$ в восточной части исследуемой области, отделяемой Тарской секущей линейментной зоной (#Т). Земная кора в этой части представлена другим типом коры, характеризующимся нарастанием скорости Р-волн с глубиной (без волноводных зон). В мантийной части этого профиля (рисунок 3б) наблюдается отличие в распределении скоростей в этой же области. Отмечается подъём высокоскоростного тела со скоростями ($V_p = 8.4$ км/с) до глубин 90 км, тогда как в другой части профиля такие скорости наблюдаются ниже глубин 140-160 км. Скоростные особенности среды вдоль Южно-Ферганского разлома (рисунок 4)

проявляются в наличии волноводных зон в глубинных слоях 20-30 км, 30-40 км, 65-80 км, наличии областей высокоскоростных включений ($V_p \geq 8.2$ км/с) на глубинах 57-70 км, наличие мантийных высокоскоростных областей ($V_p \geq 8.4$ км/с), начиная с глубин 140 -160 км в центральной и западной части разреза, тогда как в восточной части профиля области с такими скоростями наблюдаются в глубинном слое 110-200 км, при этом между этими высокоскоростными включениями отмечается область с низкими для мантии ($V_p \leq 8.1 - 8.2$ км/с) значениями скоростей. Отметим приуроченность Тарской секущей линейamentной зоны (#Т) к границе контакта высокоскоростной и низкоскоростной мантии, тогда как её проявления в земной коре не обнаружены. Землетрясение 1822 года произошло над волноводной зоной, отмечаемой в глубинных слоях 20-30 км и 30-40 км. Очаговые зоны землетрясений 1926 и 1962 годов также приурочены к волноводной зоне, но на более низких глубинах 65-80 км, где отмечается понижение скоростей до 7.6 км/с.

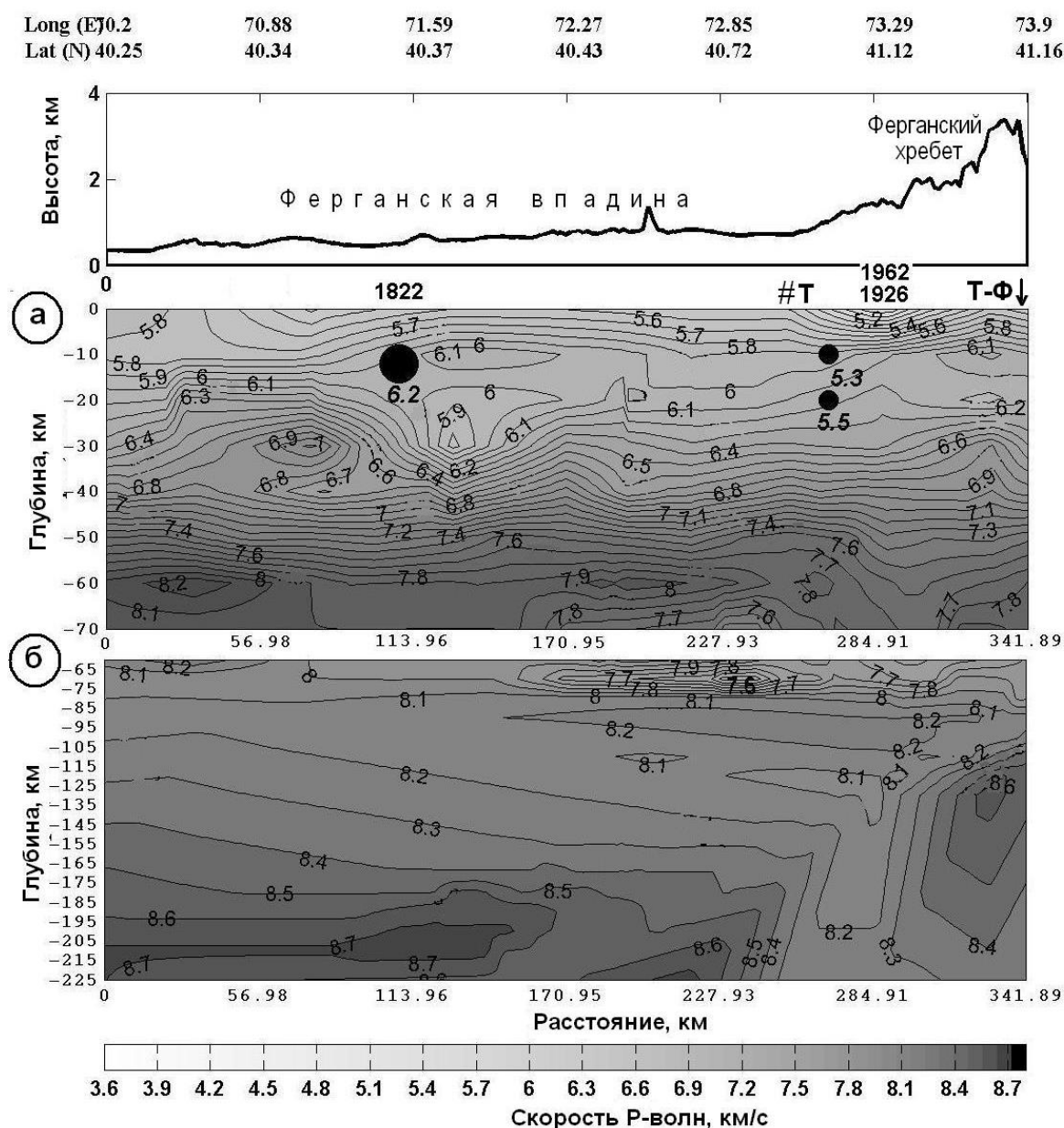


Рисунок 4. Скоростной разрез по Р-волнам вдоль Южно-Ферганского разлома; а – земная кора, б – верхняя мантия (кругами обозначены гипоцентры землетрясений с

указанием магнитуды и даты, Т-Ф – Таласо-Ферганский разлом, #Т - Тарская секущая линеаментная зона [3]).

Наряду с простирающимися вдоль разломов профилями также построен разрез вдоль меридионального профиля ($\lambda = 73^\circ$ $\phi = 39^\circ - 42^\circ$, рисунок 5), проходящего через горное обрамление Ферганской впадины и очаговые зоны некоторых сильных землетрясений. На разрезе можно отметить приуроченность гипоцентров сильных землетрясений к ярко выраженным скоростным неоднородностям земной коры. В мантии под южным горным обрамлением Ферганской впадины имеет место постепенное увеличение скорости с глубиной (скоростные аномалии в мантии проявляются севернее – под северо-восточным обрамлением Ферганской впадины и под Ферганским хребтом).

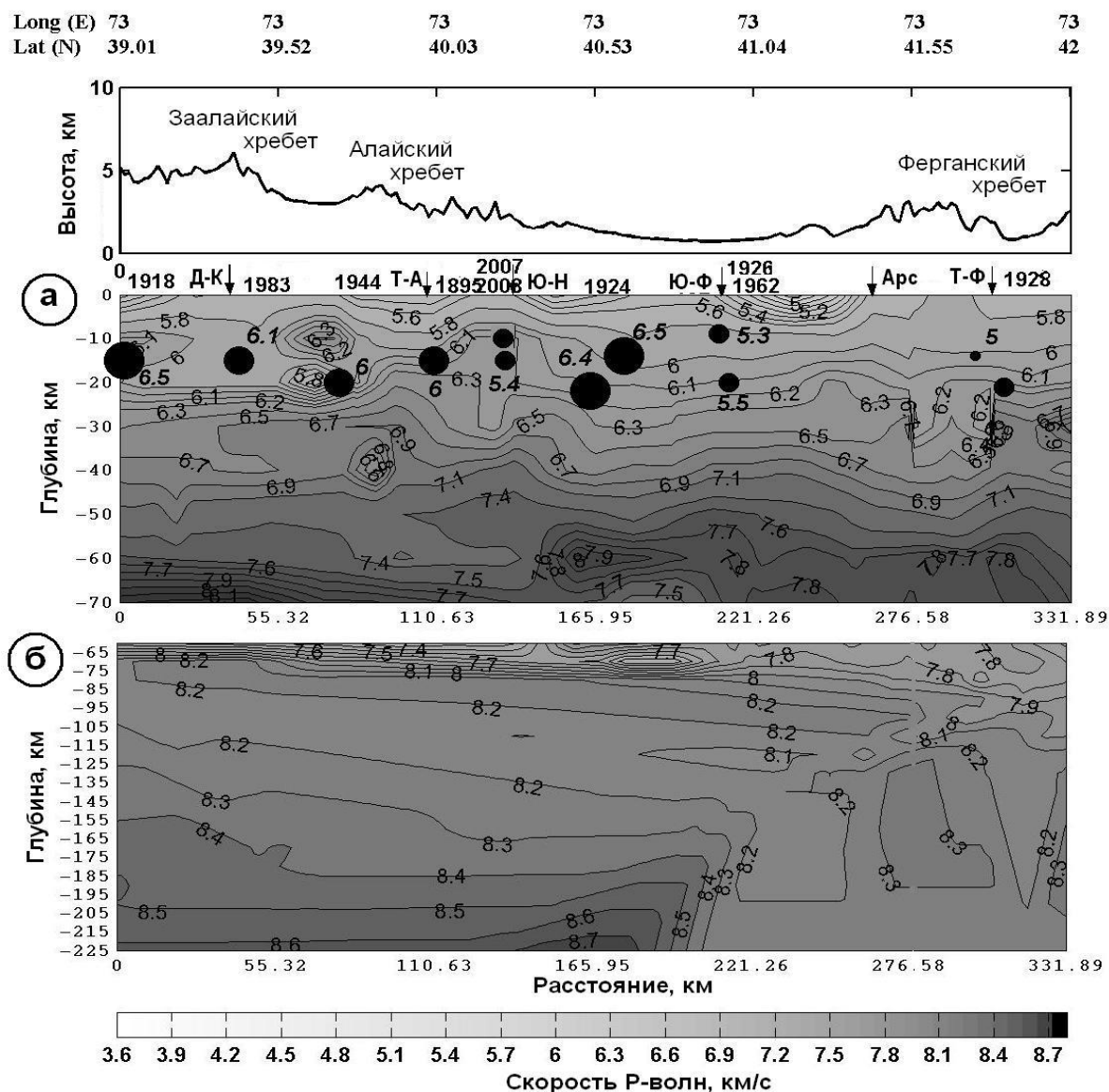


Рисунок 5. Скоростной разрез по Р-волнам, меридиональный профиль: $\lambda = 73^\circ$, $\phi = 39^\circ - 42^\circ$; **а** – земная кора, **б** – верхняя мантия.

Ранее нами [5] была рассмотрена возможность использования результатов изучения скоростного строения для выявления связи между зонами скоростных аномалий и зонами проявлениями сейсмичности. В качестве степени вероятности

проявления сейсмических событий использована нормированная функция (диапазон от 0 до 1) плотности распределения абсолютного значения градиента скорости Р-волн в очагах сильных землетрясений, трёхмерная модель которого получена на базе трёхмерной триангуляции скоростной модели литосферы Тянь-Шаня [4]. На основе проведённых расчётов получена модель зон ВОЗ (зоны возникновения ожидаемых землетрясений) с $M_{LH} \geq 5.5$ по скоростным особенностям среды [5]. На рисунке 6 представлен фрагмент этой карты-схемы зон ВОЗ с отображением степени вероятности проявления сейсмических событий в диапазоне от 0 (нулевая вероятность) до 1 (100 % вероятность). По степени вероятности проявления сейсмических событий выделились области различной конфигурации. В исследуемой Южно-Ферганской зоне отмечается чередование зон с различной степенью вероятности проявления сейсмических событий, области с наибольшей вероятностью прослеживаются узкими зонами в западной, центральной и северо-восточной её частях. К этим же зонам в основном приурочены очаги сильных землетрясений (с $M_{LH} \geq 5.5$, на рисунке 6 круги серого цвета).

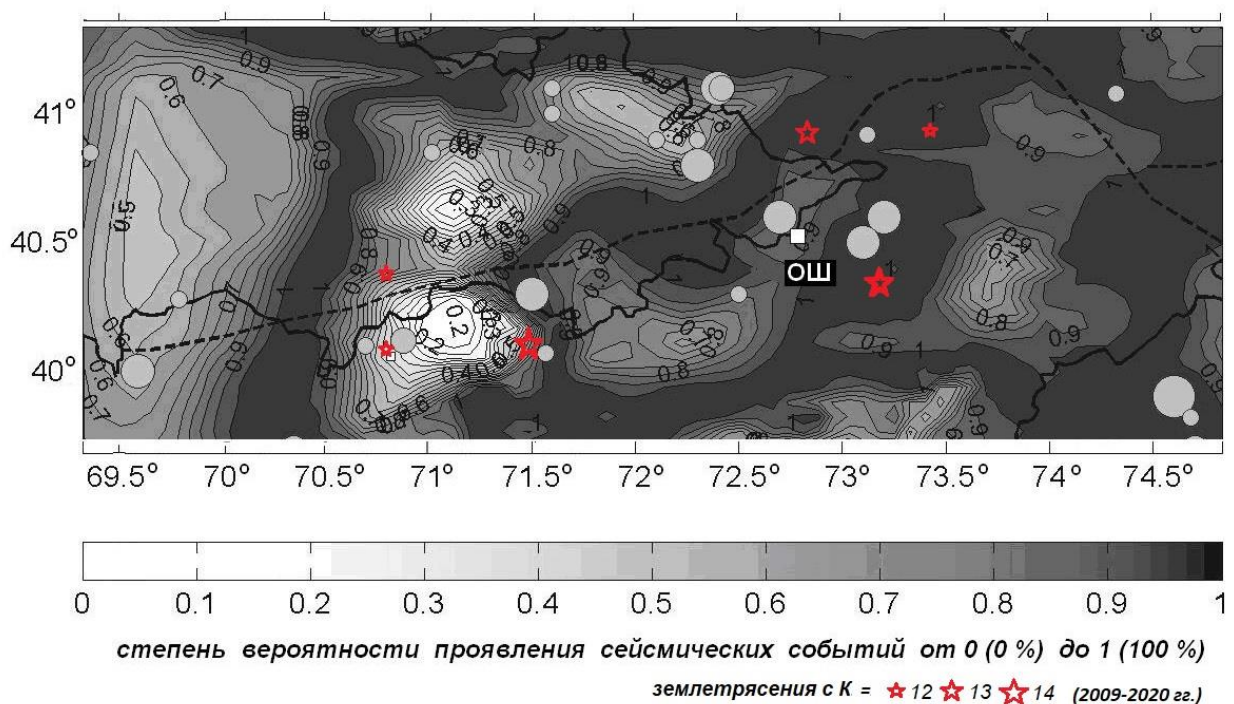


Рисунок 6. Фрагмент карты-схемы зон возникновения ожидаемых землетрясений) (с $M_{LH} \geq 5.5$) по скоростным особенностям среды [5].

После представления карты-схемы [5] в исследуемой области произошли несколько относительно сильных землетрясений (два события с $K = 14.1$ ($M_{LH} = 5.6$) в 2011, 2015 гг.; одно – с $K = 12.7$ ($M_{LH} = 4.8$) в 2009 г., три – с $K = 12.0$ в 2019 и 2020 гг., на карте-схеме рисунка 6 их местоположение отмечено красными звёздами. Как видно на рисунке 6, относительно сильные землетрясения ($M_{LH} \geq 5.0$) произошли в зонах с наибольшей вероятностью проявления сейсмических событий. В отдельных зонах с наибольшей степенью вероятности проявления сейсмических событий до настоящего времени не наблюдались землетрясения с $M_{LH} \geq 6.0$. Это позволяет сделать предположение о возможности возникновения сильных землетрясений в этих зонах в будущем.

На карте сейсмического районирования Кыргызской Республики [6], фрагмент которой приведён на рисунке 7, изучаемый район представлен сейсмогенерирующими зонами Ош-Каракульджинской (12) и Южно-Ферганской (13) в пределах которых в будущем могут возникать землетрясения с $M = 7.0$ (зона 13) $M = 7.5$ (зона 12).

Отметим, что выделенные зоны ВОЗ по градиентам скоростей находятся в хорошем соответствии с сейсмогенерирующими зонами, отмечаемыми на Карте сейсмического районирования территории Кыргызстана [6], и могут быть использованы для уточнения границ зон возникновения ожидаемых землетрясений.

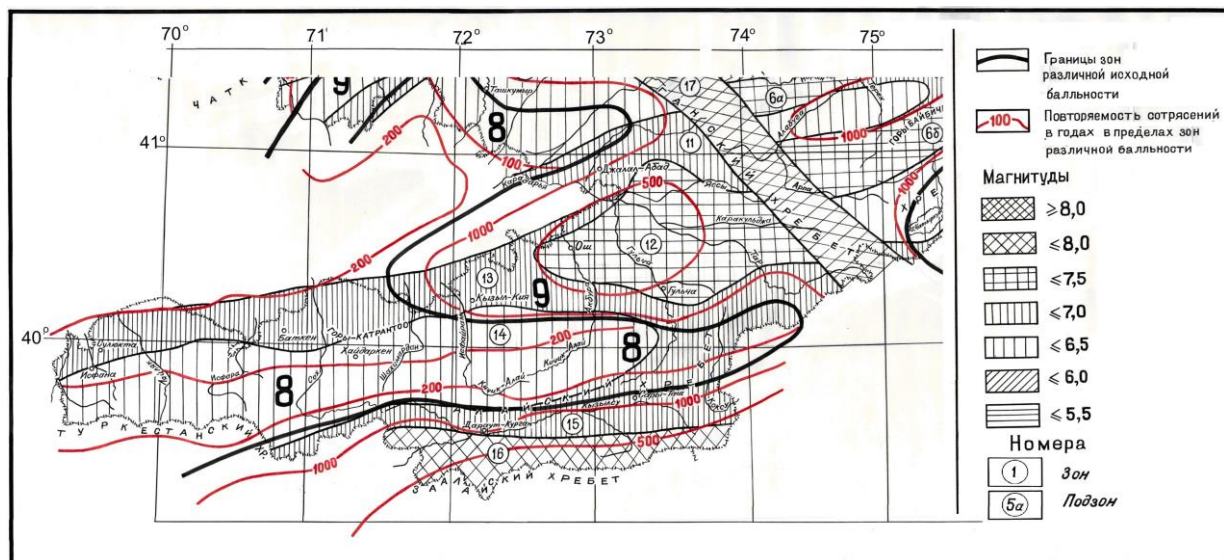


Рисунок 7. Фрагмент карты сейсмического районирования Кыргызской Республики [6].
1) Зоны: 11-Кугарт-Талдысуйская, 12-Ош-Каракульджинская, 13-Южно-Ферганская, 14-Хайдарканская, 15-Туркестано-Алайская, 16-Гиссаро-Кокшаальская, 17-Таласо-Ферганская; 2) Подзоны: 6а-Акишйракская, 6б-Байбичетауская, 6в-Атбашинская.

При интерпретации скоростной модели земной коры Тянь-Шаня более детально рассмотрены волноводные зоны (зоны понижения скорости сейсмических волн), их распределение по глубине [7, 8]. Отмечалось, что очаги сильных землетрясений тяготеют к прочным однородным телам. Очевидно, соседствующие с ними волноводы, нарушая стабильность, способствуют разрядке напряжений, поэтому они могут рассматриваться как индикаторы местоположения возможных сильных землетрясений. Количественной оценкой изменения скорости Р-волн с глубиной служил её объёмный градиент [8]. Отдельный фрагмент схемы распределения волноводных зон в земной коре Тянь-Шаня по градиенту скоростей Р-волн [8], построенной для разных глубин представлен на рисунке 8 (а – суммарное изображение волноводных зон на всех глубинах (0-60 км) в горизонтальной проекции, б – распределение волноводных зон по глубине в аксонометрической проекции) (область с координатами $\varphi=39^{\circ}$ - 41° с.ш., $\lambda=69^{\circ}$ - 75° в.д.). Полученное распределение свидетельствуют о том, что на Тянь-Шане волноводы значительно распространены как в верхней коре, так и в нижней коре и расположены преимущественно на глубинах 15 км и 35 км. Не случайно наибольшее количество землетрясений в Тянь-Шане происходит на глубинах 5-15 км [9], т. е. над верхнекоревым волноводом, расположенным на глубинах 10-20 км.

Результаты исследования

Построены скоростные разрезы в Южно-Ферганской зоне, проведённые вдоль простирания Южно-Наукатского (Ю-Ф) и Южно-Ферганского (Ю-Н) разломов, проанализирована связь очаговых областей сильных землетрясений со скоростным строением среды их формирования.

Выявлено, что особенностями скоростного строения среды формирования очагов землетрясений ($5.0 < M < 6.5$), приуроченных к южному горному обрамлению

Ферганской впадины, является ярко выраженная гетерогенность земной коры (чередование зон повышенных и пониженных скоростей Р-волн, включая волноводы) и отсутствии значимой гетерогенности мантии (скорости в ней постепенно увеличиваются с глубиной). Показана возможность использования скоростных особенностей среды для выявления зон ВОЗ (зоны возникновения ожидаемых степенью вероятности проявления сейсмичности последующих сильных событий (после составления карты –схемы [8]).

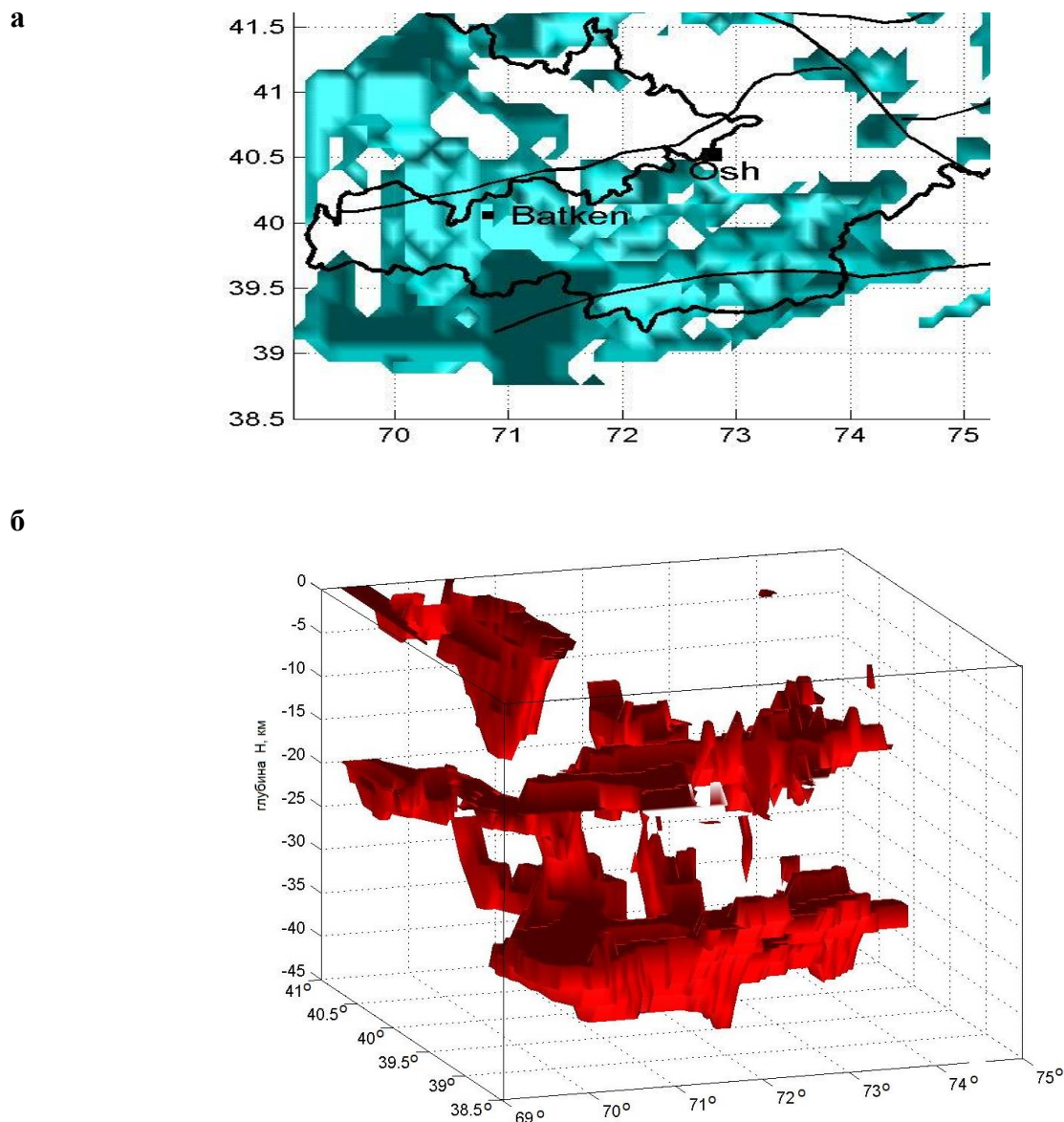


Рисунок 8. Схема распределения волноводных зон в земной коре: **а** – суммарное изображение волноводных зон на всех глубинах 0–60 км в горизонтальной проекции, **б**– распределение волноводных зон по глубине в аксонометрической проекции.

Литература

1. Чедия О.К. Кинематические типы активных разломов. // Современная геодинамика литосферы Тянь-Шаня. Москва: Наука. -1991. - С. 65-75.

2. Каталог землетрясений с энергетическим классом $K \geq 6.0$ Центра Данных Института сейсмологии НАН КР с исторических времен по 2020 год.
3. Адамова А.А., Сабитова Т.М. Трёхмерная скоростная модель земной коры Тянь-Шаня // Физика Земли, 2004. - № 5. - С. 58-67.
4. Адамова А.А., Сабитова Т.М., Миркин Е.Л., Багманова Н.Х. Трёхмерные скоростные модели литосферы, рассчитанные методами сейсмической томографии. Модели для блочной аппроксимации распределения скорости с использованием SPHYRIT 90 (алгоритм С. Рекера). // Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. Отв. ред. А.Б. Бакиров. - Бишкек: Илим, 2006. - С. 9-18.
5. Миркин Е.Л., Багманова Н.Х. Методика выделения зон ВОЗ на основе статистического анализа трёхмерной модели прогностического признака. // Сборник материалов Пятого Международного симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». - Москва-Бишкек. - 2012. –Т.1- С.52-57.
6. Карта сейсмического районирования Кыргызской Республики. - Объяснительная записка. -Бишкек. -2012. -51 с.
7. Сабитова Т.М., Адамова А.А., Миркин Е.Л. Критерии выделения зон возможных очагов землетрясений. Ослабленные зоны в скоростной структуре Р-волн земной коры и очаги сильных землетрясений. // Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. Отв. ред. А.Б. Бакиров. - Бишкек: Илим, 2006. - С. 51-55.
8. Багманова Н.Х., Миркин Е.Л., Сабитова Т.М. Волноводы в земной коре Тянь-Шаня. // Вестник Института сейсмологии НАН КР (<http://www.journal.seismo.kg>),-2014.- № 1(3). – С.31-38.
9. Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. - Фрунзе: Илим. - 1983. - 248 с.

Рецензент: Берёзина А.В.