

УДК 551.243.+551.2

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

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МОХОРОВИЧИЧА ПО СКОРОСТНОЙ 3D МОДЕЛИ Р-ВОЛН ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЫ И ЕЁ ГОРНОГО ОБРАМЛЕНИЯ

Аннотация. В статье предлагается алгоритм построения границы Мохоровичича на основе интегрированных критериев её определения, по данным трёхмерной скоростной модели земной коры и верхней мантии Тянь-Шаня. Предложенный алгоритм построения граничной поверхности Мохоровичича реализован в виде комплекса программ в среде программирования MATLAB, предназначенного для построения трёхмерной модели рельефа поверхности Мохоровичича. Районом исследования является территория Чуйской впадины и её горного обрамления.

Ключевые слова: поверхность Мохо, трёхмерная скоростная модель, земная кора, верхняя мантия.

ЧҮЙ ОЙДУҢУНУН ЖАНА АНЫН ТОО КУРЧООСУНУН АЙМАГЫ ҮЧҮН Р-ТОЛКУНДАРЫНЫН ЫЛДАМДЫК 3D МОДЕЛИ БОЮНЧА МОХОРОВИЧИЧ БЕТИНИН АВТОМАТТАШТЫРЫЛГАН ТҮЗҮЛҮШҮ

Аннотация. Макалада Мохоровичич чектерин аны аныктоонун интеграцияланган критерийлеринин негизинде, жер кыртышынын жана Тянь-Шандын жогорку мантиясынын маалыматтары боюнча тургузуунун алгоритми сунушталат. Мохоровичич чектик бетин тургузуунун сунушталган алгоритми Мохоровичич бетинин рельефинин үч өлчөмдүү моделин тургузуу үчүн арналган MATLAB программалоо чөйрөсүндөгү программалар комплекси түрүндө ишке ашырылган. Изилдөө району болуп Чүй ойдуңунун аймагы жана анын тоо курчоосу саналат.

Негизги сөздөр: Мохо бети, үч өлчөмдүү ылдамдык модели, жер кыртышы, жогорку мантия.

AUTOMATIC CONSTRUCTION OF THE MOHO SURFACE ON THE 3D VELOCITY MODEL P-WAVE FOR CHY DEPRESSION AND ITS MOUNTAIN BOUNDARY

Abstract. An algorithm for Moho border construction based on integrated criteria of its definition according to data on the three-dimensional velocity model of the crust and upper mantle of Tien-Shan is presented in the paper. The proposed algorithm for construction of the Moho boundary surface is implemented as a programs package on the base of MATLAB environment, intended for the construction of three-dimensional model of Moho surface of the Chu depression and its mountain boundary.

Keywords: Moho border, the three-dimensional velocity model, the crust, upper mantle.

В [1] был представлен разработанный прототип программного комплекса расчёта и построения трёхмерной модели рельефа поверхности Мохоровичича. Однако детальный анализ полученных результатов выявил некоторую неточность определения границ Мохо в неоднозначно трактуемых случаях. В дальнейшем алгоритм назначения границ Мохо по скоростной модели Р – волн был пересмотрен и улучшен. Представленный в [1] материал относится к территории Северного Тянь-Шаня, куда входит район Чуйской впадины и её горного обрамления ($\varphi=42.0^\circ - 43.5^\circ$ с.ш., $\lambda=73.0^\circ - 76.0^\circ$ в.д.). Нам представляется естественным показать результаты работ, пересмотренных в сторону уточнения и улучшения.

Граница Мохоровичича - планетарная поверхность, которая принята за нижнюю границу земной коры. За столетие, прошедшее после открытия в 1909 году Андреем Мохоровичичем «раздела», названного его именем – граница Мохоровичича (сокращённо граница Мохо), представление о геологической природе этой границы расширились. Сегодня известны модели коро-мантийного раздела, полученные различными методами, например: *преломлённый Мохо* (соответствующий первоначальной модели А.Мохоровичича) – поверхность на глубине, где резко возрастает скорость сейсмических волн; *отражённый Мохо* – поверхность, фиксируемая наиболее глубинными протяжёнными отражениями или группами сближенных субпараллельных отражений на глубинах, приблизительно совпадающих с другими оценками мощности коры; *электрический Мохо* – фиксирует резкое изменение электропроводимости на глубинах, приблизительно совпадающих с *преломлённым Мохо*. Открытие раздела Мохо впервые выявило некую границу между породами, наблюдаемыми на поверхности Земли, которые стали называть «земной корой», и «мантийными» породами на глубине, характеризующимися более высокой плотностью [2]. Методом глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) было показано, что граница Мохо - резкая граница двух сред с разными физическими свойствами. Также было установлено, что форма границы Мохо изменчива по площади, она прогибается под горными сооружениями и поднимается под впадинами [3]. Тесная связь глубины границы Мохо с дневным рельефом отражает одно из главных свойств этой границы: на ней осуществляется изостатическое равновесие земной коры. Ранее предполагалось, что такое равновесие осуществляется на кровле астеносферы, а не внутри жёсткой литосферы. На уровне Мохо переход вещества в состояние истинной пластичности может быть причиной формирования слоев повышенной и пониженной скорости. Это связано с тем, что вещество в таком состоянии характеризуется пониженной проницаемостью и под ним могут образоваться прослойки с пониженными сейсмическими скоростями. Подтверждение этому предположению получено по некоторым электромагнитным данным. Флюиды способны коренным образом преобразовать горные породы, превращая их в пластичное вещество. Это означает возможность формирования на уровне Мохо ослабленных прослоев, по которым происходит течение материала и подвижки отдельных блоков земной коры. Такая модель границы Мохо объясняет многие её особенности. Прежде всего, её подвижность в пространстве и времени. Выравнивание границы Мохо под разрушающимися горными сооружениями и другие процессы изостатического её выравнивания могут происходить за счёт перетекания вещества по ослабленным зонам. Подвижки блоков земной коры вдоль таких зон тоже выравнивают эту границу и превращают ее в зону высоких напряжений, в которой образуются анизотропные прослойки с аномально высокими сейсмическими скоростями. Подвижность границы Мохо может иметь и другую природу. Сейсмическими исследованиями показано, что при крупных преобразованиях земной коры эта граница не просто опускается или поднимается, она разрушается и снова формируется на определённых уровнях давления и температуры. В результате можно наблюдать «двойное Мохо», то есть древнюю и молодую границу. Таким образом, подошва земной коры,

граница Мохоровичича, является не только границей смены состава веществ, но это граница изменения его механических свойств [3].

Многие авторы определяют границу Мохо как сейсмическую границу, на которой происходит резкое изменение скорости продольных сейсмических волн с 6.5 – 7.5 (в коре) до 7.8 – 8.2 (км/с) (в верхней мантии). Также определяют её и как границу, на которой наблюдается резкое уменьшение градиента скорости от 0.1 – 0.2 до 0.01 (с⁻¹) [4]. Последний признак часто не принимался во внимание, однако, он представляется нам важным, так как в соответствии с [4] – «...только в результате резкой смены большого градиента скорости на исчезающе малый градиент обеспечивается устойчивость прослеживания первых волн на большом интервале расстояний с почти неизменной мантийной скоростью и образованию интенсивной группы рефрагированных волн в последующих вступлениях».

Модификация процедуры построения границы Мохо. Необходимая для дальнейших исследований трёхмерная модель скоростных полей сейсмических волн была получена сотрудниками лаборатории « Геофизических методов изучения сейсмоопасных зон» Института сейсмологии НАН КР с использованием разработанного в лаборатории комплекса программ для построения скоростных полей Тянь-Шаня на базе трёхмерной триангуляции скоростной модели литосферы Тянь-Шаня [5]. Комплекс программ позволяет восстановить значение скоростей изменения продольных Р – волн в любой заданной точке трёхмерного пространства изучаемого фрагмента «массива земной коры и верхней мантии».

Расчёт и построение трёхмерной модели поверхности Мохо осуществим для территории Чуйской впадины и её горного обрамления, ограниченного координатами: 42.0° – 43.5° с.ш., 73.0° – 76.0° в.д. Представленный в [1] материал был пересмотрен. Детальный анализ полученных результатов выявил некоторую неточность определения границ Мохо в неоднозначно трактуемых случаях. В дальнейшем алгоритм назначения границ Мохо по скоростной модели Р – волн был уточнён и улучшен.

Зависимости изменения скоростей продольных Р – волн от глубины в диапазоне предполагаемого присутствия границы Мохо (30 – 80 км) в каждой географической точке изучаемого региона индивидуальны. И для того, чтобы правильно установить границу Мохо в соответствии с [6 – 9], необходимо одновременно учитывать несколько важных факторов:

- резкое изменение скорости продольных Р-волн при переходе из коры в мантию, что означает наличие максимального градиента скорости Р – волн в диапазоне предполагаемого присутствия границы Мохо (30 – 80 км);
- отсутствие резкого изменения скорости в слое верхней мантии, располагающемся сразу же за границей Мохо, что означает резкое уменьшение градиента скорости $G\kappa_v$ от 0,1 – 0,2 до 0,01 1/с.
- скорость продольных Р-волн в точке перехода должна быть в диапазоне пороговой скорости V_{br} (например, $V_{br} \in [7.3, 7.8]$).

Для алгоритмической реализации указанных факторов был разработан программный модуль, интеллектуально учитывающий три указанных выше фактора одновременно для принятия решения о назначении границы Мохо. Результаты работы данного модуля иллюстрируют рисунки 1 – 3. Из приведённых рисунков видно: граница Мохо назначается системой на максимальном изменении градиента в каждом конкретном случае индивидуально, учитывая второй и третий факторы, приведённые выше.

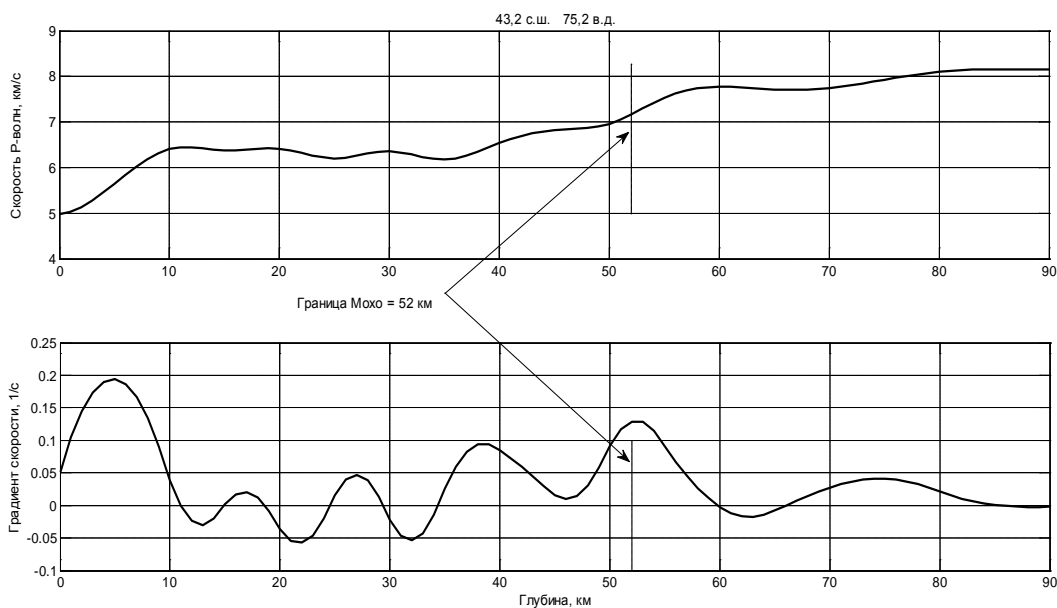


Рис. 1. Назначение границы Мохо для точки с координатами: 43.2° с.ш., 75.2° в.д.

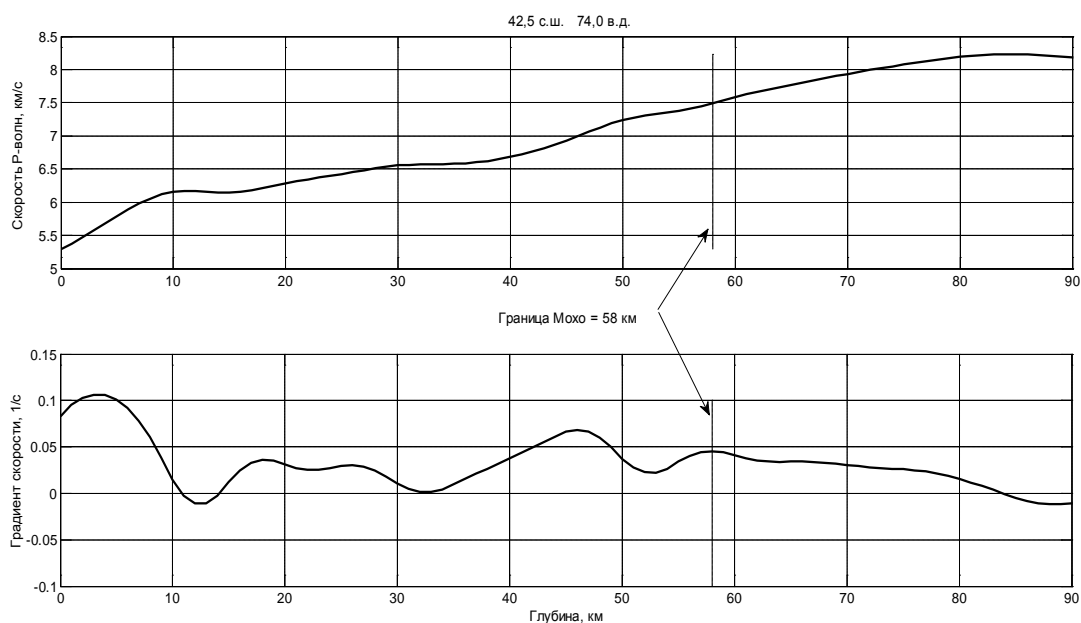


Рис. 2. Назначение границы Мохо для точки с координатами: 42.5° с.ш., 74.0° в.д.

Таким образом, разработанный программный модуль назначения границы Мохо в конкретной географической точке изучаемого района позволил путём применения алгоритмов объёмной триангуляции данных уточнить полученное ранее двухмерное и трёхмерное представление рельефа поверхности Мохо территории Чуйской впадины и её горного обрамления. Результаты работы программного комплекса изображения рельефа поверхности Мохо представлены на рисунках 5, 6. Рисунок 5 демонстрирует двухмерное представление рельефа поверхности Мохо изучаемого района; на рисунке 6 изображена трёхмерная модель. Из рисунков видно, глубина залегания поверхности Мохо территории Чуйской впадины и её горного обрамления зоны варьирует от 41 км до 63 км. На большей части исследуемой территории мощность земной коры представлена значениями 51-57 км. Максимальное значение глубины залегания поверхности Мохо (66 км) отмечается на двух

локальных участках в юго-западной и юго-восточной частях. В северо-западной части преобладают области с глубиной залегания поверхности Мохо 49-54 км.

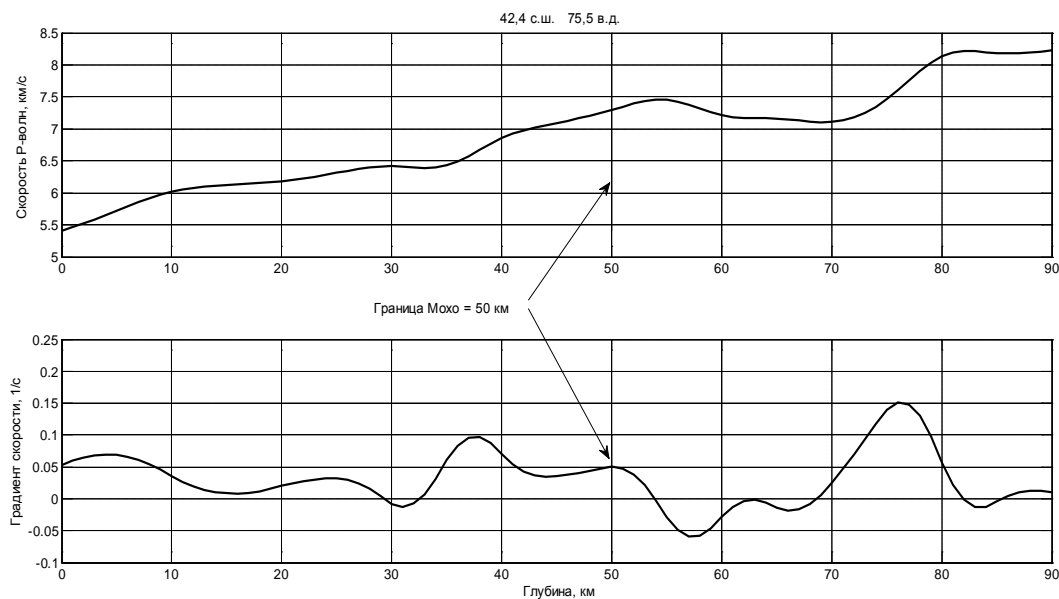


Рис. 3. Назначение границы Мохо для точки с координатами: 42.4° с.ш., 75.5° в.д.

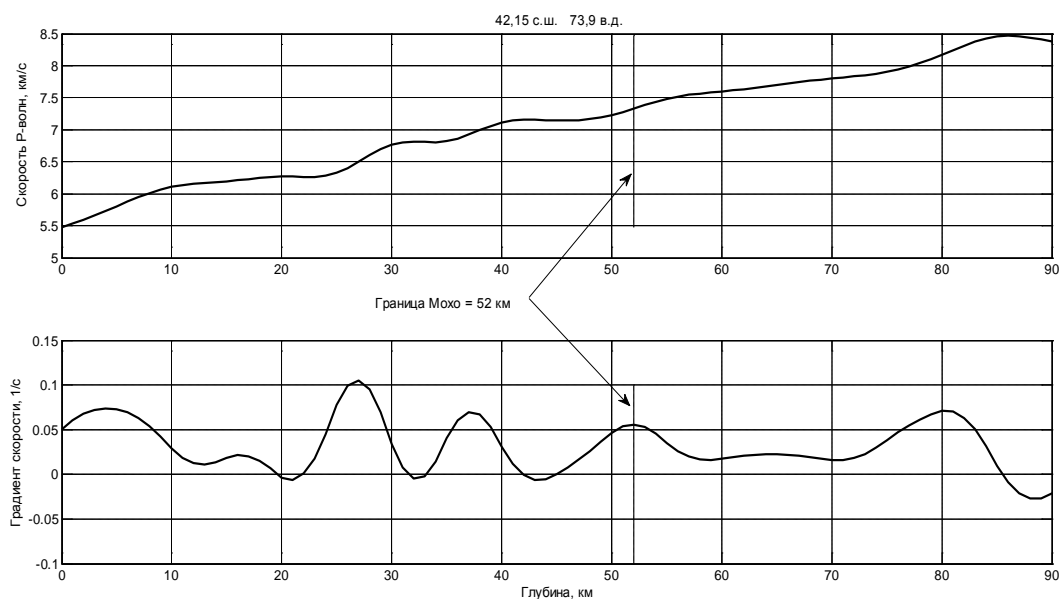


Рис. 4. Назначение границы Мохо для точки с координатами: 42.15° с.ш., 73.9° в.д.

Участки, на которых глубина залегания поверхности Мохо имеет минимальные значения (36-39 км), также представлены локальными областями в юго-западной, северо-восточной и юго-восточной частях исследуемой территории. В трёхмерном представлении рельефа поверхности Мохо (рис.6) отчётливо видны области с нестабильным распределением поверхности Мохо в юго-западной и восточной частях территории Чуйской впадины и её горного обрамления – отмечается чередование областей с различной глубиной поверхности М: 36-39 км, 42-45 км, 48-51 км, 60-63 км, 63-66 км. Это свидетельствует о довольно сложном строении поверхности Мохо для этих частей исследуемой территории. Возможно с этим связан характер проявления сейсмичности (рис.7). Сильные землетрясения ($M \geq 5.0$, $K > 13$) приурочены к краевым частям

сочленения областей со стабильным и нестабильным распределением Мохо. Среди них отметим такие как Беловодские землетрясения 1770, 1885 годов, землетрясения 1868, 1893, 1935 годов, Суусамырское 1992 года. При этом слабая сейсмичность ($5.0 < M > 1.7$, $13.0 < K > 7.0$) преобладает именно в областях с нестабильным распределением Мохо.

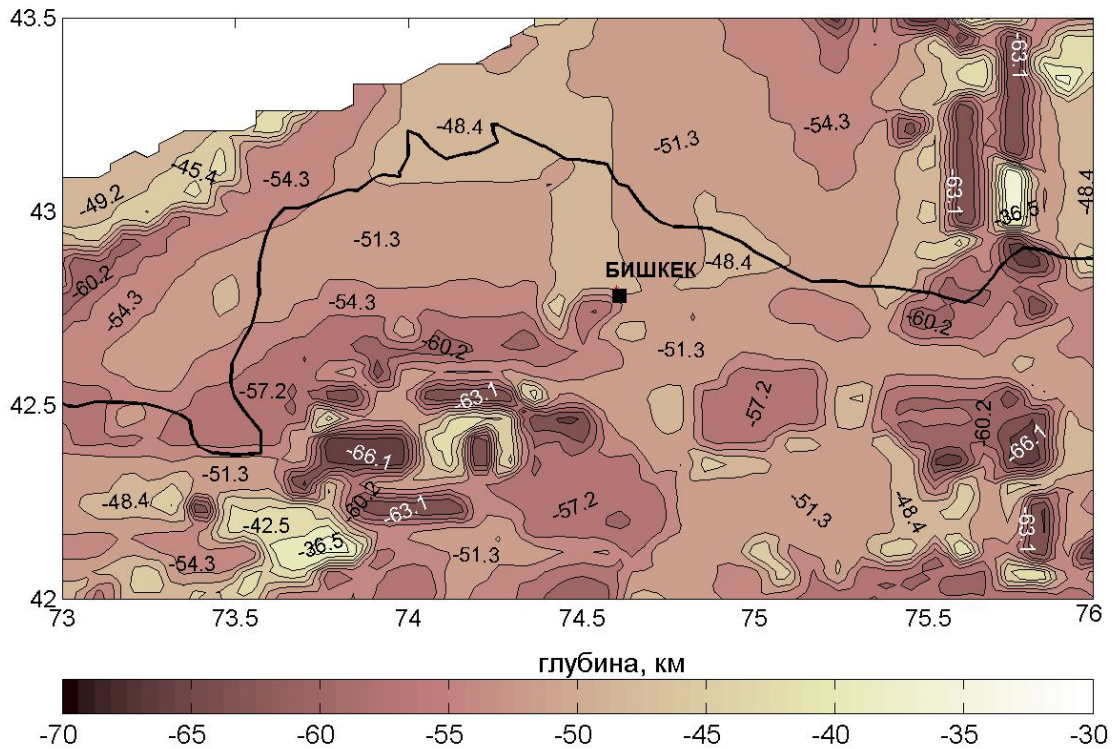


Рис. 5. Рельеф поверхности Мохо, полученный программным комплексом по изменению скоростей продольных Р – волн.

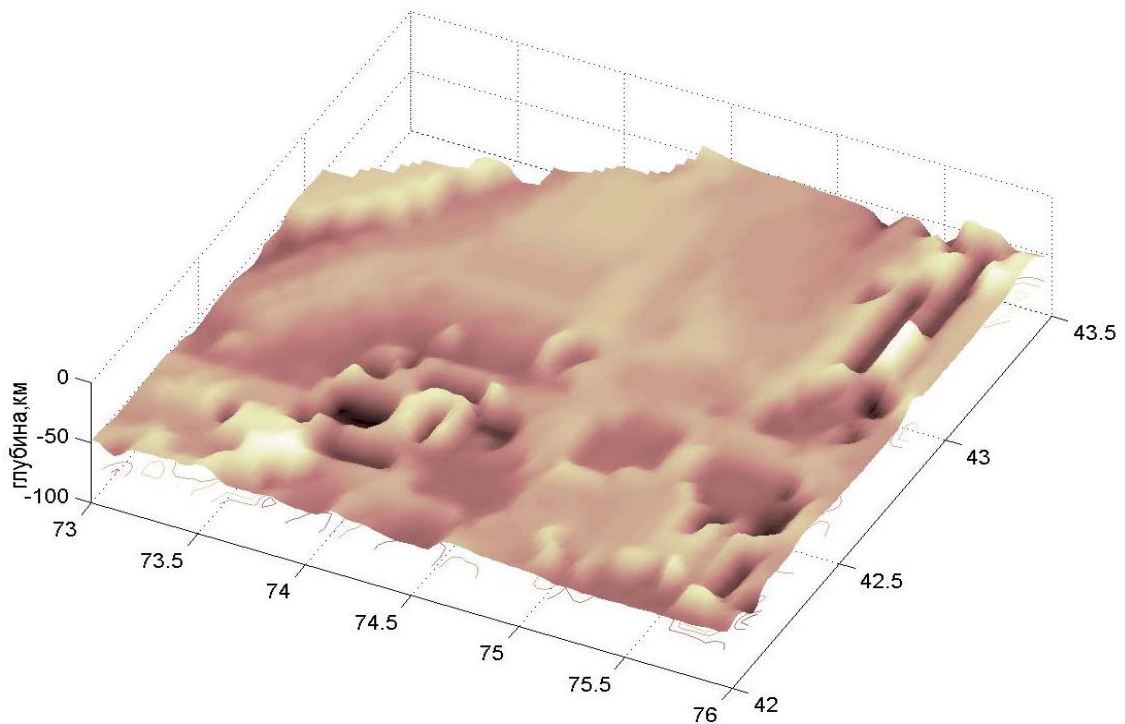


Рис. 6. Трёхмерное представление рельефа поверхности Мохо.

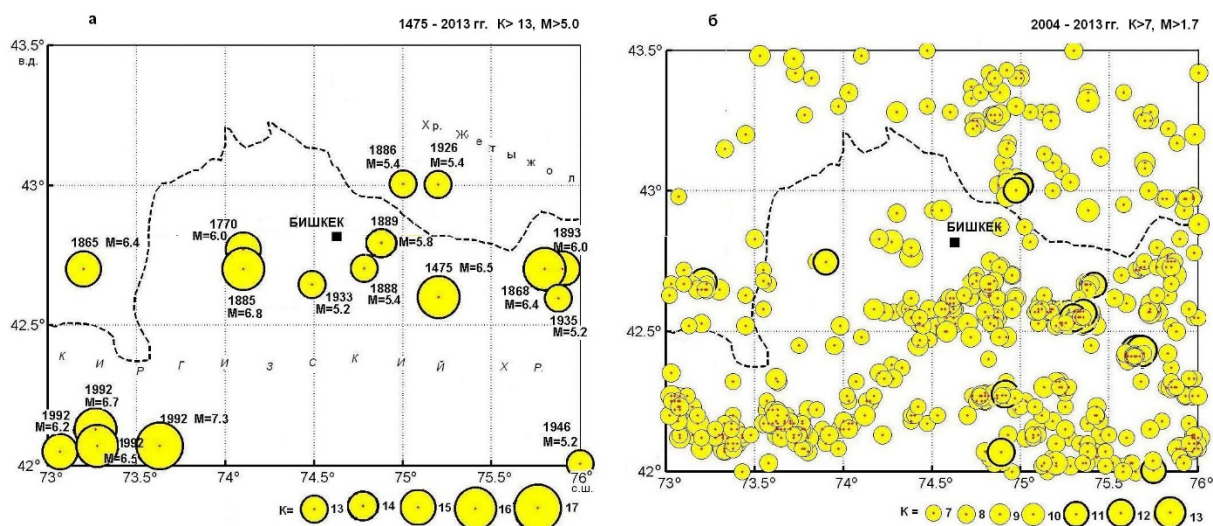


Рис.7. (а). Распределение сильных землетрясений ($M \geq 5.0$, $K > 13.0$) с древнейших времён по 2013 год; (б) распределение слабой сейсмичности ($5.0 < M < 1.7$, $13.0 < K < 7.0$) с 2004 по 2013 гг.

Отличительной особенностью представленной ранее [1] схемы рельефа поверхности Мохо для территории Чуйской впадины и её горного обрамления являлось наличие областей с максимальным погружением поверхности Мохо до 70-75 км. На всех полученных ранее другими авторами [10-14 и др.] картах-схемах рельефа поверхности Мохо таких значений не отмечалось. Пересмотрение и уточнение алгоритма назначения границ Мохо по скоростной модели Р-волн в дальнейшем позволило нам опровергнуть наличие таких областей в районе исследования, это нашло отражение на рисунке 5 и рисунке 6. Максимальное значение глубины залегания поверхности Мохо для района исследования 63-66 км, при этом граница М на 66 км отмечается только на двух локальных участках в юго-западной и юго-восточной частях.

Существует ряд схем рельефа поверхности Мохо, их обзор хорошо представлен в работах [10,11]. Направленность изолиний мощности земной коры, построенных разными авторами, в целом одинакова, различия в абсолютных значениях глубины залегания поверхности Мохо в одних и тех же зонах, как правило, не выходят за пределы существующей точности определения этой границы. Эта поверхность в пределах исследуемой территории залегает на глубинах 45-50-55-60 км по данным [10, 11, 12]. По [14] значения глубины залегания поверхности Мохо варьирует от 45 до 62 км. Схема рельефа поверхности Мохо для территории Чуйской впадины и её горного обрамления, полученная предлагаемым выше способом, в целом не противоречит данным других исследователей.

- Разработан, уточнён и усовершенствован программный комплекс изображения рельефа поверхности Мохо с использованием сейсмотомографических данных.
- Получено двухмерное и трёхмерное представление рельефа поверхности Мохо территории Чуйской впадины и её южного горного обрамления (координаты: $42.0^\circ - 43.5^\circ$ с.ш. и $73.0^\circ - 76.0^\circ$) (рис. 5, 6).
- Глубина залегания поверхности Мохо территории Чуйской впадины и её горного обрамления зоны варьирует от 41 км до 66 км. На большей части исследуемой территории мощность земной коры представлена значениями 51-57 км. Максимальные и минимальные значения глубины залегания поверхности Мохо отмечаются на локальных участках и представлены значениями 63-66 км и 36-39 км.

- Уточнение алгоритма назначения границ Мохо по скоростной модели Р-волн не подтвердило наличие областей с максимальным погружением поверхности Мохо до 70-75 км в районе исследования, которые были получены в предыдущем исследовании [1].

Литература

1. Миркин Е.Л., Багманова Н.Х. Разработка программного комплекса расчёта и построения трёхмерной модели рельефа поверхности Мохоровичича Северного Тянь-Шаня. // Вестник Института сейсмологии НАН КР (www.seismo.kg) - 2015.- № 6. С.
2. Минц М.В. Коро-мантийная граница и нижняя кора в фундаменте Восточно-Европейской платформы. // Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой. Материалы XLV Тектонического совещания. – М.: ГЕОС.-2013.- с.122-126.
3. Павленкова Н.И. Природа границы М по геофизическим данным. // Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой. Материалы XLV Тектонического совещания. – М.: ГЕОС.-2013.- с.138-141.
4. Павленкова Н. И., Косминская И. П. и др. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. - Москва: Наука. - 1980. - С. 144.
5. Адамова А.А., Сабитова Т.М., Миркин Е.Л., Багманова Н.Х. 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. - Бишкек: Илим.- 2006.- С.9-18.
6. Резанов И. А. Эволюция представлений о земной коре.- Москва: Наука.- 2002.- С.300.
7. Резанов И. А., Файтельсон А.Ш., Краснопевцева Г. В. Природа границы Мохоровичича.- Москва: Недра. - 1984. –С.118-120.
8. Павленкова Н. И. Структура литосферы и задачи сейсмических исследований. // Исследования земной коры невзрывными сейсмическими источниками. - Москва: Наука. -1981.
9. Павленкова Н. И. Структура земной коры и верхней мантии и тектоника плит. // Геодинамические исследования.- Москва: Наука. -1989.- № 13.
10. Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. // Фрунзе: Илим.-1983.-248 с.
11. Сабитова Т.М. Скоростные особенности и блоковое строение земной коры. // Современная геодинамика литосферы Тянь-Шаня.-Москва: Наука.-1991.-С.19-23.
12. Сабитова Т.М. Строение земной коры Кыргызского Тянь-Шаня по сейсмологическим данным.- Фрунзе: Илим.-1989.-174 с.
13. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). - Москва: Научный Мир.- 2005. - 400с.
14. Погребной В.Н. Гребенникова В.В. Особенности тектонической структуры поверхности Мохо на территории Кыргызского Тянь-Шаня по гравитационным данным. // Сборник докладов 5-го Международного симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». Москва-Бишкек. - 2012. –Т. 2– С.100-105.

Рецензент: к. ф.-м. н. Фролова А.Г.