

УДК 550.34 (575.5)

Багманова Н.Х., Гребенникова В.В.,
Миркин Е.Л., Малосиева М.Т., Погребной В.Н.
*Институт сейсмологии НАН КР,
г.Бишкек, Кыргызстан*

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМООПАСНЫХ ЗОН ТЯНЬ-ШАНЬСКОГО ОРОГЕНА

Аннотация: В статье приведены основные результаты научно-исследовательских работ лаборатории «Геофизические методы изучения сейсмоопасных зон». Разработана трёхмерная скоростная модель земной коры и верхней мантии до глубины 225 км. В результате её использования выявлены существенные скоростные неоднородности в земной коре и мантии, с которыми тесно связано формирование очагов сильных землетрясений. Определены признаки отражения разломов и разломных зон в геофизических полях, которые позволяют выявлять и уточнять территориальные и структурные положения как видимых, так и скрытых разломов.

Ключевые слова: геофизические поля, магнитное поле, гравитационное поле, зоны ВОЗ, поверхность Мохо, признаки отражения разломов, трёхмерная скоростная модель, неоднородность, земная кора, мантия.

ТЯНЬ-ШАНЬ ОРОГЕНИНИН СЕЙСМОКОРКУНУЧТУУ ЗОНАЛАРЫН ИЗИЛДӨӨНҮН ГЕОФИЗИКАЛЫК МЕТОДДОРУ

Кыскача мазмуну: Макалада «Сейсмокоркунучтуу зоналарды изилдөөнүн геофизикалык методдору» лабораториясынын илимий-изилдөө иштеринин негизги жыйынтыктары келтирилген. Жер кыртышынын жана жогорку мантиясынын 225 км терендигине чейинки үч өлчөмдүү ылдамдык модели иштелип чыккан. Аны пайдалануунун натыйжасында алар менен күчтүү жер титирөөлөрдүн очокторунун калыптанышы тыгыз байланышта болгон жер кыртышынын жана мантиясынын олуттуу ылдамдыктардын бирдей эместиктери аныкталган. Жараңкалардын жана жараңкалуу зоналардын геофизикалык талааларда чагылдырылуу белгилери аныкталган, алар жараңкалардын аймактык жана структуралык көрүнгөн жана жашыруун абалдарын аныктап чыгууга жана тактоого мүмкүндүк берет.

Негизги сөздөр: геофизика талаалары, магниттик талаа, гравитациялык талаа, ВОЗ зоналары, Мохоүстүңкү бети, жараңкалардын чагылуу белгилери, үч өлчөмдүү ылдамдык модели, бир кылка эместик, жер кыртышы, мантия.

GEOPHYSICAL METHODS OF INVESTIGATION OF THE TIEN-SHAN OROGEN SEISMICALLY ACTIVE ZONES

Abstract: The paper presents the main results of scientific investigation of "Geophysical methods of the earthquake zones investigation" laboratory. The three-dimensional velocity model of the crust and upper mantle to a depth of 225 km has been developed. The significant velocity heterogeneities in the crust and mantle, which are closely related to the strong earthquakes sources formation, were detected. The features of fault and corresponding zones reflection in geophysical fields allowing to identify and clarify the spatial and structural location both visible and hidden faults are defined.

Keywords: geophysical fields, magnetic field, gravitational field, the earthquake zones, surface Moho, three-dimensional velocity model, the features of fault, velocity model, the crust, upper mantle.

Одной из основных задач, входящих в комплекс исследований Института сейсмологии НАН КР, является изучение скоростного и глубинного строения земной коры и верхней мантии в связи с сейсмичностью. Без знания строения среды, в которой происходят землетрясения, невозможно познание природы геодинамических процессов.

В этом плане лаборатория «Геофизических методов изучения сейсмоопасных зон» выполняет работы по двум направлениям:

1. Изучение скоростных свойств земной коры и верхней мантии Кыргызского Тянь-Шаня методами сейсмотомографии.
2. Анализ геофизических материалов для выявления отличительных особенностей геофизических полей с целью уточнения глубинного строения Кыргызского Тянь-Шаня в связи с сейсмичностью.

Цель исследований по первому направлению – выявление основных закономерностей в скоростном строении земной коры и верхней мантии методами сейсмотомографии, позволившая выявить скоростные неоднородности, на основе которых установлена связь между зонами скоростных аномалий и проявлениями сейсмичности, а также разработать определенные критерии выявления очаговых зон возможных сильных землетрясений.

Цель исследований по второму направлению – изучение глубинного строения Кыргызского Тянь-Шаня путем анализа карт аномального магнитного и гравитационного полей. Особенности геофизических полей используются для выделения аномалиеобразующих тел с определением элементов залегания и физических свойств (намагниченность и плотность) составляющих их пород. Аномалиеобразующие тела – это интрузивные образования, внедряющиеся в ослабленные и раздробленные зоны глубинных разломов, с которыми, как правило, связано формирование очагов землетрясений.

Поставленные цели и вытекающие из них задачи решаются сотрудниками лаборатории с использованием современных методов исследования. Например, изучение особенностей скоростного строения земной коры и верхней мантии осуществляется с помощью нового и быстро развивающегося направления в сейсмологии, получившего название сейсмической томографии [1].

Первая трёхмерная скоростная модель земной коры Тянь-Шаня, построенная с помощью сейсмической томографии, была рассчитана в 1993 году при сотрудничестве кыргызских, российских и американских сейсмологов [2]. Расчёты выполнены с использованием пакета программ С. Рекера. Сейсмотомография – поэтапный процесс. По мере совершенствования базы экспериментальных данных и системы наблюдений, существующие модели детализировались [3,4,5], глубинность исследований увеличивалась [6].

Рассчитанная трёхмерная скоростная модель, помимо получения сведений о скоростной структуре Тянь-Шаня, позволила приблизиться к пониманию сложных геодинамических процессов, протекающих в исследуемом регионе.

На основе трёхмерной скоростной модели литосферы Тянь-Шаня, построены горизонтальные срезы и скоростные разрезы земной коры и верхней мантии вдоль протяжённых меридиональных и широтных профилей в пределах территории Кыргызского Тянь-Шаня (интервале глубин 0-225 км). Анализ всех построенных разрезов впервые позволил получить детальные данные о скоростных неоднородностях верхней мантии изучаемой территории [6].

На основе интерпретации трёхмерных скоростных моделей установлено, что земная кора Тянь-Шаньского орогена отличается от коры окружающих его стабильных районов более низкоскоростной структурой средней и нижней части коры. Для исследуемого района характерны 2 типа земной коры: классический – кора с нарастанием скорости с глубиной (Ферганская впадина и ее восточное горное обрамление) [7] и кора с волноводами (Чуйская впадина и ее горное обрамление и Алайская впадина и ее горное обрамление) [8]. Выявлены существенные скоростные неоднородности в коре и мантии: в первую очередь, ослабленные

зоны – области понижения положительного градиента скорости при увеличении глубины (замедление роста скорости с глубиной) или отрицательного её градиента (уменьшения скорости с глубиной) [6, 7, 8].

Для территории, включающей Северный, Срединный и Южный Тянь-Шань ($\varphi=39^{\circ}-43^{\circ}30'$; $\lambda=73^{\circ}30'-76^{\circ}$) характерно различие структуры коры под впадинами и горными сооружениями. Наиболее отчётливо оно проявляется в зоне сочленения Чуйской впадины с её южным горным обрамлением. Для наглядности по указанному району приведены несколько горизонтальных срезов (рисунок 1а) и вертикальный скоростной разрез Р-волн в диапазоне 0-225 км (рисунок 1б). Из рисунка 1 видно, что под впадиной, расположенной над высокоскоростной мантией, имеет место высокоскоростная кора, характерная для платформенных областей. Под Киргизским хребтом отмечается постепенное нарастание скорости с глубиной – низкоскоростные корни гор уходят в мантию. Ряд известных краевых разломов находят свое отражение на поверхности границ раздела разноскоростных блоков, расположенных в мантии.

На этом же рисунке чётко видна следующая особенность в скоростной структуре: нормальное увеличение скорости Р-волн проявляется до глубины ~ 60 км, в дальнейшем (глубина ~ 80 км) скорость Р-волн резко возрастает, а затем до глубины ~ 130 км резко уменьшается. Подобные скоростные структуры носят название «волноводов». Поиски «волноводов» явились одной из важных задач лаборатории, т.к. большинство очагов сильных землетрясений расположены вблизи их территориального местоположения. Отметим, что эта задача успешно решена [8, 9].

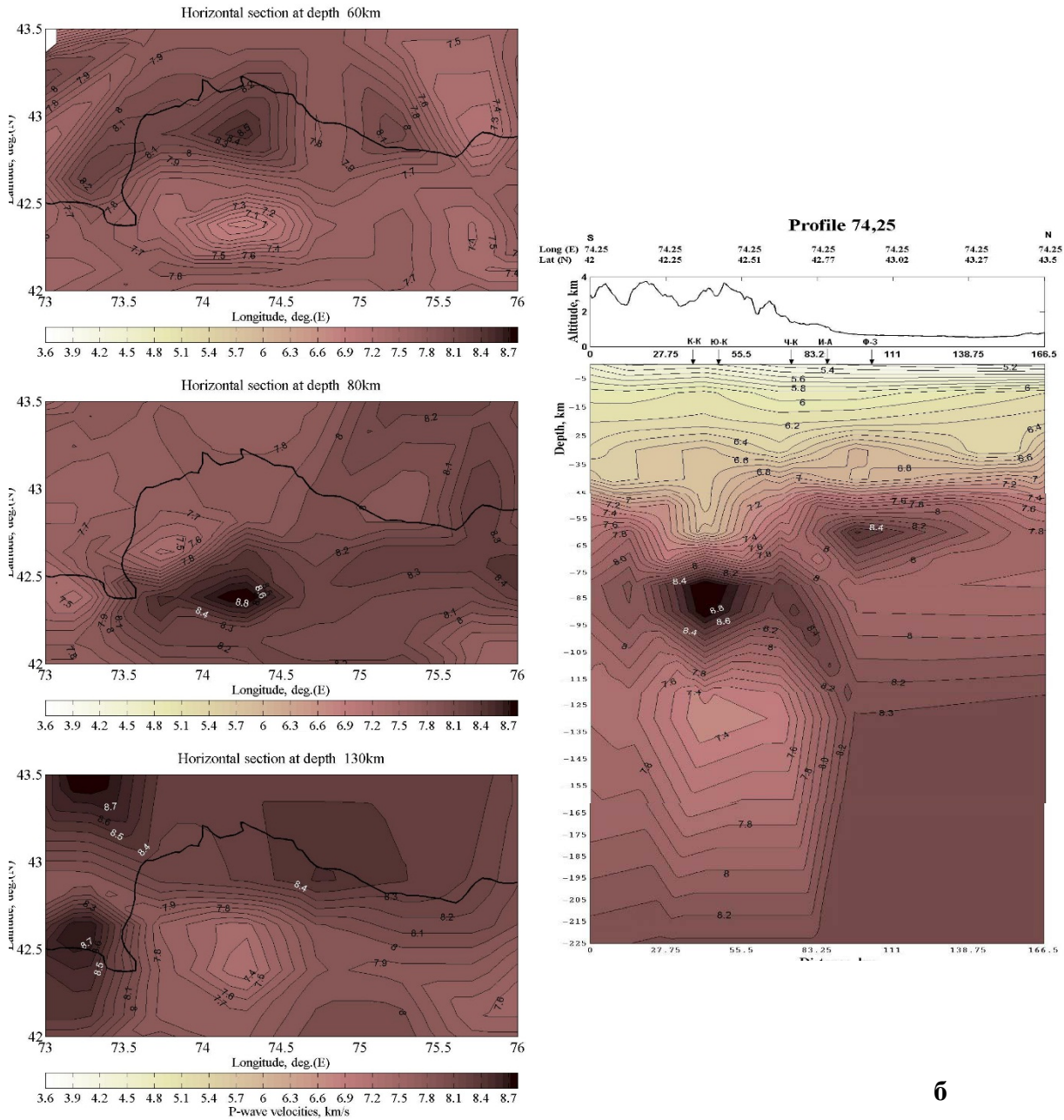
Описанная выше скоростная структура Р-волн характерна и для других районов Тянь-Шаньского орогена, что даёт основание сделать следующие выводы:

1. Скоростная структура земной коры Тянь-Шаньского орогена до глубины ~ 35 км имеет нормальное постепенное увеличение скорости сейсмических волн с глубиной.

2. Выделяется переходная зона, кора-мантия, в диапазоне глубин 35-65 км. Она может включать в себя несколько границ, в том числе и поверхность Мохоровичича. В пределах исследуемой территории поверхность Мохоровичича располагается на разных глубинах и характеризуется различной граничной скоростью [10].

3. Глубинная структура верхней мантии характеризуется существенными скоростными неоднородностями – наличием разноскоростных блоков и субвертикальных границ раздела. Неоднородности в мантии наиболее ярко выражены в центральной части Тянь-Шаня, включающей области Северного, Срединного и Южного Тянь-Шаня. Под Северным Тянь-Шанем в верхней мантии проявляются протяжённые субвертикальные зоны аномально низких значений скорости, под Срединным и Южным – аномально высоких. По мере возрастания глубины скоростная гетерогенность мантии нивелируется и на глубинах около 200 км под центральной частью исследуемой территории, а также в области сочленения Тянь-Шаня с Таримским массивом мантийные скорости оказываются аномально низкими ($V_p < 8.2$ км/с) для данной глубины. Вышеописанная мантийная структура и её отражение в нижней коре, по-видимому, является свидетельством проявления в Тянь-Шане процессов плюмтектоники – внедрения в кору высокотемпературного мантийного вещества.

4. Формирование зон сильных землетрясений в коре непосредственно связано с особенностями строения мантии – её скоростными неоднородностями, что свидетельствует об определяющей роли мантии в происхождении и проявлении сейсмических процессов [6, 11].



6

Рисунок 1 Распределение скоростей Р-волн для различных глубинных срезов (а), скоростной разрез по Р- волнам вдоль профиля 74,25° (б). (Разломы: К-К -Каракольский, Ю-К -Южно-Кыргызский, Ч-К –Чонкурчакский, И-А -Иссык-Атинский, Ф-З –флексурно-разрывная зона).

Выявленные особенности скоростного строения земной коры и верхней мантии Кыргызского Тянь-Шаня были использованы при разработке критериев выделения очаговых зон возможных сильных землетрясений. Установлены признаки очаговых зон землетрясений: в исследуемом районе они располагаются в областях высокого градиента скорости Р-волн как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Как правило, очаговые зоны приурочены к поверхности инверсионного слоя (волноводов), находящегося на глубинах 25-35 км, а также к глубинным разломам, отделяющим впадины от горных сооружений. Отметим, что области присутствия волноводов могут рассматриваться как индикаторы местоположения очаговых зон сильных землетрясений.

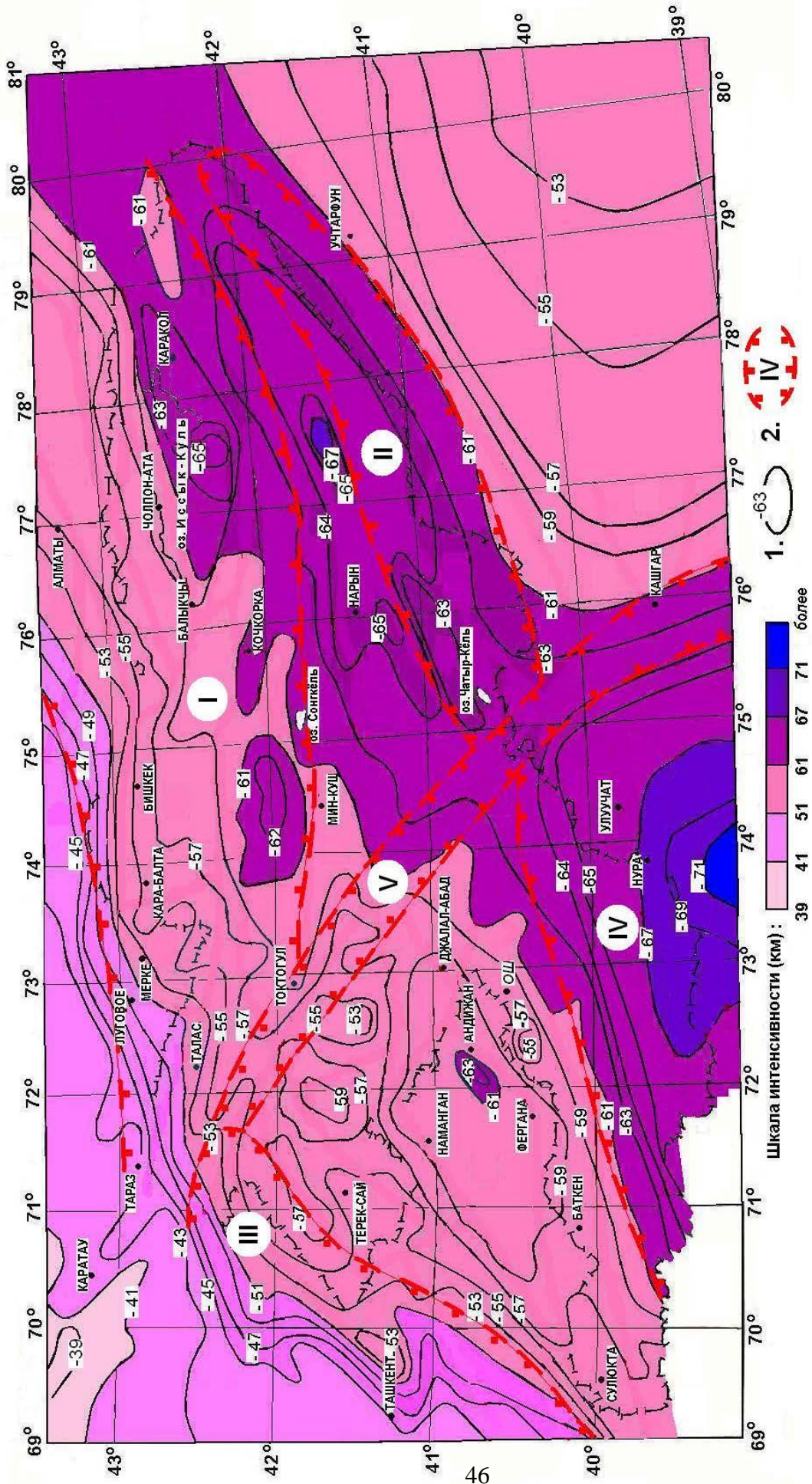


Рисунок 2. Карта изоглубин поверхности Мохо территории Кыргызстана и сопредельных стран (построена в соответствии с величинами аномального гравитационного поля в редукции Буге): 1. Изоглубины поверхности Мохо в км, 2. Зоны ВОЗ: I-Северная, II-Южная, III-Западная, IV-Алай-Заалайская, V-Таласо-Ферганская. Составлена В.Н.Погребным, В.В. Гребенниковой.

Установленные закономерности позволяют усовершенствовать методику выделения зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) и найдут применение для прогноза мест возможных очагов сильных землетрясений [6, 12].

Для более достоверного выделения и оконтуривания зон ВОЗ потребовалось применение комплекса геофизических методов, в первую очередь, гравиметрических и магнитометрических. Для этого были собраны данные по распределению гравитационных и магнитных полей для территории Кыргызского Тянь-Шаня, интерпретация которых, в совокупности с сейсмотомографическими данными, позволило уточнять территориальное положение зон ВОЗ. В качестве примера на рисунке 2 приведена карта изоглубин поверхности Мохо территории Кыргызского Тянь-Шаня в масштабе 1:1000000, построенная по данным интерпретации гравитационного поля (Δg) в редукции Буге. Из рисунка 2 видно, что поверхность Мохо под всей территорией Кыргызского Тянь-Шаня образует глубокий тектонический прогиб типа обширной синеклизы, ограниченной со всех сторон уступами, к которым территориально приурочены очаги произошедших сильных землетрясений [10].

В период 2012-2014 гг. Институт сейсмологии НАН КР решал задачи по выполнению проекта «Оценка сейсмической опасности и риска на территории Кыргызской Республики», цель которого – оценка сейсмической опасности территории Кыргызстана на основе анализа комплекса геолого-геофизических методов и выявление взаимосвязи динамики зон активных разломов и их сегментов с современным сейсмическим режимом. Выбор цели не случаен, так как очаги землетрясений в большинстве случаев располагаются не хаотично, а в сейсмогенных зонах, генетически связанных с разломами земной коры и верхней мантии, а сила землетрясения определяется размерами вспарывания разлома или его сегментов.

В этом плане лаборатория «Геофизических методов изучения сейсмоопасных зон» выполняла тему «Геофизические особенности структур земной коры и верхней мантии в отдельных районах восточной части Кыргызского Тянь-Шаня (для изучения геометрии активных разломов)». Для детального изучения был выбран Бишкекский участок ($\varphi=42^{\circ}10'-43^{\circ}$; $\lambda=73^{\circ}30'-75^{\circ}30'$), включающий в себя Чуйскую впадину и её горное обрамление и относящийся к районам с высокой сейсмичностью. Проведена комплексная интерпретация следующих материалов: карты аномального магнитного поля (ΔT)а масштаба 1:100 000, карты-схемы масштаба 1:1000 000 изоглубины поверхности Кюри, аномального гравитационного поля (Δg)а в редукции Буге и поверхности Мохо, серии вертикальных скоростных разрезов земной коры и верхней мантии до глубины 225 км, серии горизонтальных срезов [13, 14].

В результате сопоставительного анализа были выявлены признаки отражения разломов и разломных зон в магнитном и гравитационном полях, особенностях скоростного строения, распределении эпицентров ощутимых землетрясений. Использование перечисленных выше признаков позволило уточнить протяжённость и глубинность как визуально наблюдаемых, так и скрытых разломов и определить месторасположение наиболее сейсмоопасных тектонических узлов на изучаемом участке [14, 15, 16]. Пример отражения видимых и скрытых разломов в аномальном магнитном (ΔT)а поле в зоне сочленения Чуйской впадины и её горного обрамления приведён на рисунке 3. Из рисунка 3 видно, что как видимые, так и скрытые разломы чётко выделяются по признаку сгущения линейно-вытянутых изодинам или по цепочке линейно-вытянутых магнитных аномалий обоих знаков, образуя в некоторых случаях тектонические узлы, наиболее опасные в сейсмическом отношении. Кроме того, проводилось изучение некоторых физических свойств пород, слагающих земную кору Кыргызского Тянь-Шаня, а именно: плотности (σ) по данным скоростей продольных и поперечных сейсмических волн [17] и магнитную восприимчивость (χ) по данным магнитных аномалий (ΔT)а поля [18, 19]. По данным количественных расчётов верхняя кромка аномалиеобразующих тел

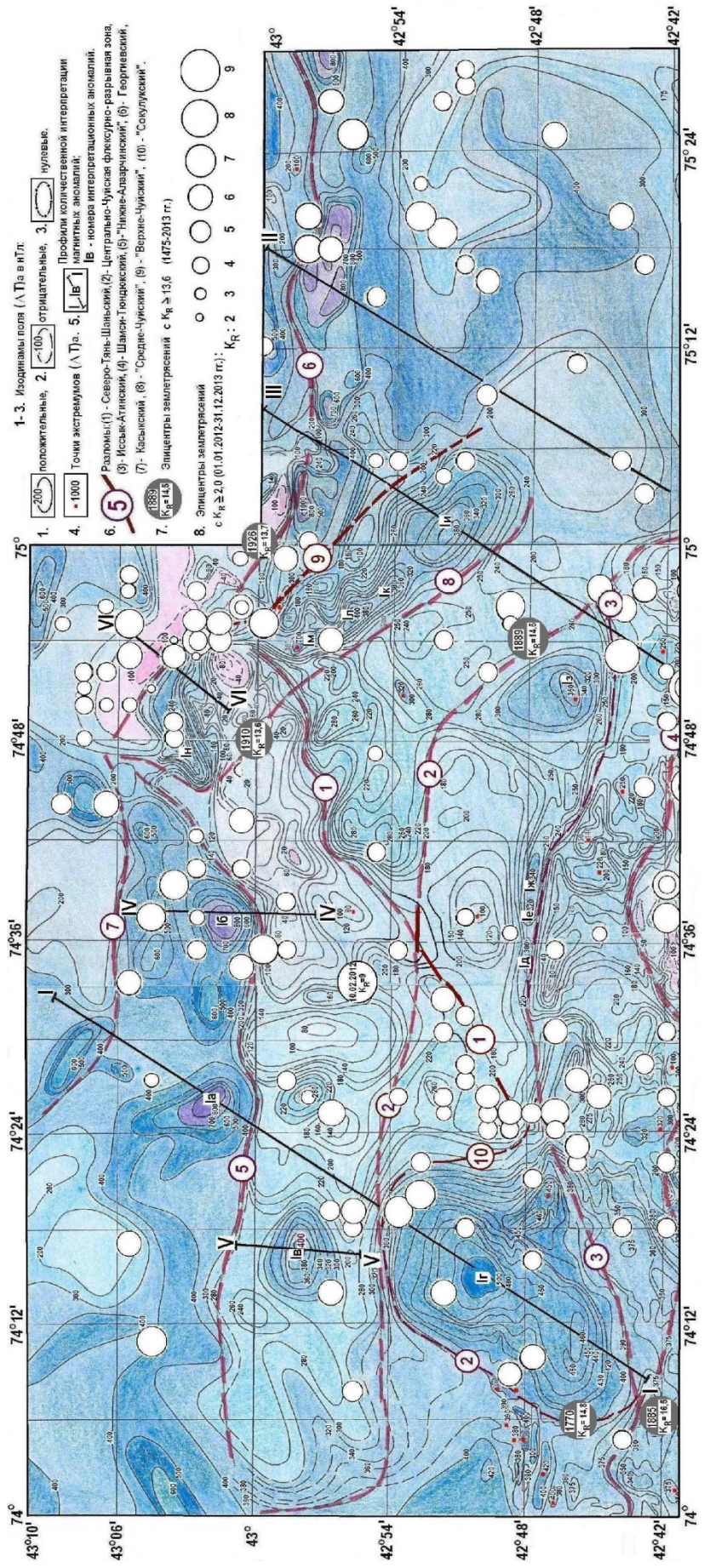


Рисунок 3. Карта отражения видимых и скрытых разломов в аномальном магнитном (ΔT)а поле масштаба 1:100 000 в зоне сочленения Чуйской впадины и её горного обрамления.

располагается в мезо-кайнозойском чехле впадины, но во многих случаях нижняя кромка достигает значительных глубин (до 30 км) в палеозойском фундаменте. Поэтому важно было оценить мощность магнитоактивного слоя путём определения положения поверхности Кюри, глубже которой все ферромагнитные минералы (магнетит, титано-магнетит и пирротин) теряют свои магнитные свойства, что и ограничивает нижнюю кромку магнитовозмущающих тел. Определение глубины поверхности Кюри выполнено Гребенниковой В.В. по данным расчёта температур радиогенного теплового поля и построена 3D модель поверхности Кюри с гипоцентрами землетрясений с $K_R \geq 2$, произошедших с 01.01.2012 г. по 31.12.2013 г. в пределах координат: $\varphi=42^\circ 42' - 43^\circ 12'$, $\lambda=74^\circ - 75^\circ 30'$ (рисунок 4).

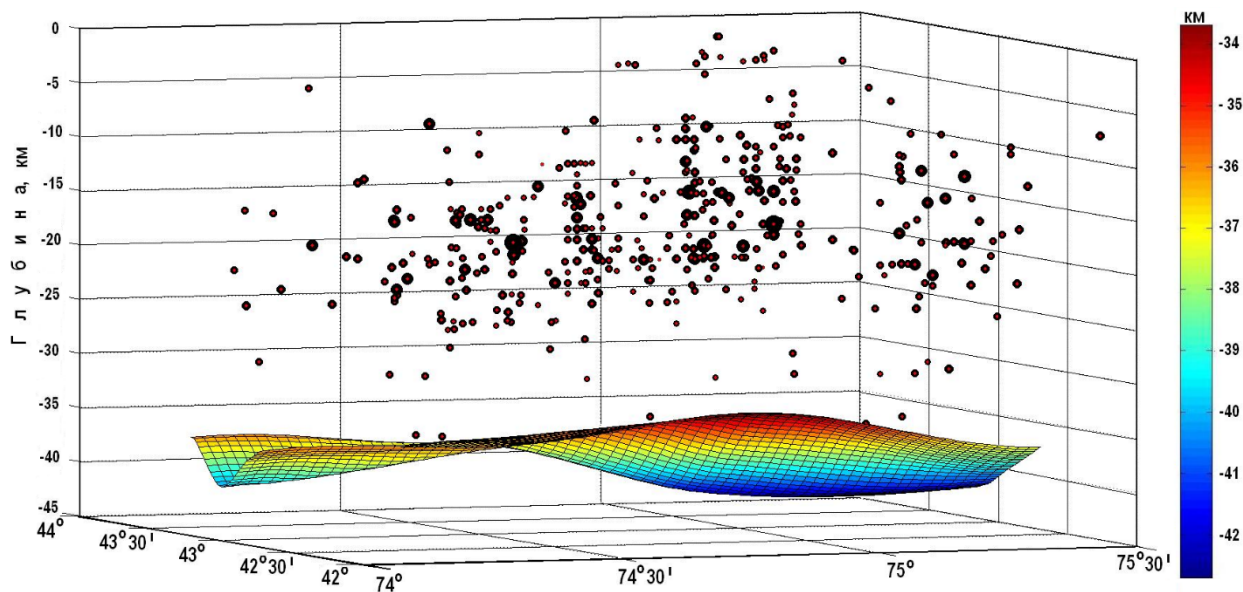


Рисунок 4. 3D модель поверхности Кюри с гипоцентрами землетрясений с $K_R \geq 2$, произошедших с 01.01.2012 г. по 31.12.2013 г.

Из рисунка 4 видно, что изоглубины поверхности Кюри на изучаемой территории варьируют в пределах от -31 км до -43 км. Большинство гипоцентров землетрясений с $K_R \geq 2$, произошедших с 01.01.2012 г. по 31.12.2013 г., располагаются в диапазоне глубин ~8-25 км, то есть на глубинах, где горные породы находятся в хрупком состоянии. Глубже 25 км по данным расчётов глубин поверхности Кюри для рассматриваемой территории горные породы находятся в пограничной зоне перехода из хрупкого в пластическое состояние, что значительно уменьшает возможность формирования на этих глубинах очагов сильных землетрясений.

Разработанная методика комплексных детальных работ была апробирована в районе Текесской линейной зоны и позволила выявить скрытый (секущий) Текес-Сарыджазский активный сейсмогенерирующий разлом [20] - в 2013 году, 28 января, восточнее разлома произошло Сарыджазское землетрясение $M=6.5$.

В перспективе лаборатория намерена выполнять подобные детальные комплексные исследования на других наиболее сейсмоопасных участках Кыргызского Тянь-Шаня, продолжая решение задач по изучению их глубинного строения геофизическими, сейсмотомографическими и сейсмическими методами с выявлением геофизических признаков наличия разломов и их сегментов, играющих основную роль в картировании и оконтуривании зон ВОЗ.

Результаты исследований лаборатории широко публикуются в известных зарубежных («Физика Земли», «Геология и геофизика», «Geophysical Research» и др.) и республиканских

журналах («Наука и новые технологии», «Известия НАН КР», «Известия ВУЗов») и докладываются на Международных форумах и конференциях.

Литература

1. Сейсмическая томография./ Под ред. Г. Нолета.- Москва: Мир.-1990.- 416 с.
2. 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.-Vol.98.- No.B9.- P.15779-15795.
3. Сабитова Т.М., Адамова А.А. Сейсмотомографические исследования земной коры Тянь-Шаня. Результаты. Проблемы. Перспективы. // Геология и Геофизика».- 2001.- Т.42.- №10.- С.1543-1553.
4. Адамова А.А., Сабитова Т.М.. Трёхмерная скоростная модель земной коры Тянь-Шаня. // Физика Земли.- № 5.- 2004. - С.58-68.
5. Сабитова Т.М., Адамова А.А., Меджитова З.А., Багманова Н.Х. Трёхмерная скоростная модель земной коры Тянь-Шаня по данным сейсмотомографических исследований.// Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). – Москва: Научный мир.- 2005.-С. 118-134.
6. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью./ Отв. ред. А.Б. Бакиров. – Бишкек: Илим.- 2006.- 116 с.
7. Багманова Н.Х., Миркин Е.Л. Южно-Ферганская зона: скоростные свойства и сейсмичность.// Известия НАН КР. – Бишкек: Илим.-2012.-№ 1.- С.25-30.
8. Багманова Н.Х., Миркин Е.Л., Сабитова Т.М. Волноводы в земной коре Тянь-Шаня. // Вестник Института сейсмологии НАН КР.- 2014.- № 1. интернет-журн. URL: http://www.journal.seismo.kg/archive/journal_2014-4/article6.pdf .
9. Сабитова Т.М., Меджитова З.А. Инверсия скорости Р-волн в земной коре Тянь-Шаня.//Активный геофизический мониторинг литосферы Земли. Материалы международной конференции; сентябрь 2005 г. - Новосибирск.- 2005.-С.262-267.
10. 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.
11. Багманова Н.Х., Миркин Е.Л. О роли мантии в формировании очаговых зон сильных землетрясений Тянь-Шаня. // Материалы Международной конференции, посвященной 70-летию Института геологии НАН КР «Геодинамика, оруденение и геоэкологические проблемы Тянь-Шаня»- Бишкек: Илим.- 2013.- С.45-51.
12. Миркин Е.Л., Багманова Н.Х. Методика выделения зон ВОЗ на основе статистического анализа трехмерной модели прогностического признака. // Сборник материалов Пятого Международного симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» – Москва-Бишкек, 2012. –Т.1- С.52-57.
13. Погребной В.Н., Гребенникова В.В. Особенности геофизических полей в зоне сочленения Чуйской впадины и ее горного обрамления. // Тезисы докладов шестого Международного симпозиума «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов».- Бишкек. - 2014.- С.131.
14. Багманова Н.Х., Миркин Е.Л. Особенности скоростной структуры земной коры и верхней мантии зоны сочленения Чуйской впадины и ее южного горного обрамления. // Тезисы докладов шестого Международного симпозиума «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов».- Бишкек, 2014.- С.354.
15. Погребной В.Н. Гребенникова В.В. Отличительные особенности аномального магнитного (ΔT) поля в отдельных сейсмогенерирующих блоках территории Кыргызского Тянь-

- Шаня // Сборник материалов 5-го Международного симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». Москва-Бишкек. - 2012.- Т.1 –С.58-64.
16. Погребной В.Н., Гребенникова В.В. Выявление основных признаков отражения глубинных и сейсмоактивных разломов в гравитационном (Δg)а поле. //Материалы Международной конференции, посвященной 70-летию Института геологии НАН КР «Геодинамика, оруденение и геоэкологические проблемы Тянь-Шаня». – Бишкек: Илим. - 2013. – С. 172-178.
 17. Миркин Е.Л., Багманова Н.Х. Разработка программного комплекса расчета и построения трехмерной плотностной модели земной коры на основе теоретико-экспериментальных моделей. // Вестник Института сейсмологии НАН КР. - 2013. - № 2. интернет-журн. URL: http://www.journal.seismo.kg/archive/journal_2013-2/article8.pdf
 18. Погребной В.Н., Гребенникова В.В., Першина Е.В. Результаты интерпретации локальных (остаточных) аномалий магнитного (ΔT)а поля Бишкекского участка Северного Тянь-Шаня. //Вестник Института сейсмологии НАН КР. - 2013. - № 1. интернет-журн. URL: http://www.journal.seismo.kg/archive/journal_2013-1/article13.pdf
 19. Погребной В.Н., Гребенникова В.В., Першина Е.В. Результаты интерпретации локальных (остаточных) аномалий магнитного (ΔT)а поля Кочкорского участка Северного Тянь-Шаня. Вестник Института сейсмологии НАН КР. - 2013. - № 2. интернет-журн. URL: http://www.journal.seismo.kg/archive/journal_2013-2/article13.pdf
 20. Абдрахматов К.Е., Погребной В.Н., Гребенникова В.В., Волкова Т.Л. Геолого-тектонические и геофизические особенности Текес-Сарыджазского секущего (скрытого) глубинного разлома. // Наука и новые технологии. - Бишкек. - 2012.- № 6.- С. 62-72.