

ГЛУБИННАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПАМИРО-АЛАЙСКОЙ ЗОНЫ

А.К. Рыбин, В.Е. Матюков, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева

Научная станция РАН в г. Бишкек, 720049, Бишкек, Киргизия

Представлены результаты профильных магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) зондирований Памиро-Алайской зоны. Рассмотрены вопросы построения двумерной геоэлектрической модели литосферы Памиро-Алайской зоны и ее характеристики. Результаты инверсии МТ-зондирований свидетельствуют о существовании зоны латерального пластического течения в земной коре под Алайской впадиной, проявившейся в виде нижнекоровой проводящей структуры, прослеживаемой на участке длиной не менее 200 км в субширотном направлении вдоль простирания Алайской впадины. На основе анализа взаимосвязи параметров геоэлектрической структуры с распределением сейсмичности исследуемой области выявлено соответствие положения гипоцентров землетрясений с энергетическим классом $K > 11$, произошедших на территории Памиро-Алая, с особенностями геоэлектрической структуры земной коры этого района. Получены новые данные о тектонической расчлененности земной коры, позволяющие дополнить и уточнить существующую геолого-геофизическую информацию о глубинном строении зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня. Сделаны выводы о возможной природе аномальной коровой проводимости в Алайской впадине.

Магнитотеллурическое зондирование, геоэлектрическая модель, электропроводность, сейсмичность, литосфера, Памир, Тянь-Шань.

DEEP GEOELECTRIC STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST AND UPPER MANTLE OF THE PAMIR-ALAI ZONE

A.K. Rybin, V.E. Matyukov, V.Yu. Batalev, and E.A. Bataleva

Results of profile magnetotelluric (MT) and magnetovariational (MV) soundings of the Pamir-Alai zone are presented. The problems of construction of a 2D geoelectric model of the lithosphere of the Pamir-Alai zone and its characteristics are considered. The results of the MT sounding inversion indicate the existence of a zone of lateral plastic flow in the Earth's crust beneath the Alai depression, which manifested itself as a conductive lower-crust structure traced for at least 200 km in the E-W direction along the strike of the Alai depression. Analysis of the relationship between the parameters of the geoelectric structure and the seismicity distribution in the study region has revealed a spatial correlation between the location of the hypocenters of $K > 11$ earthquakes that occurred in the Pamir-Alai territory and the geoelectric structure of the Earth's crust in this region. New data on the tectonic stratification of the Earth's crust have been obtained, which permits us to supplement and refine the existing geological and geophysical data on the deep structure of the Pamir-Tien Shan junction zone. Conclusions about the nature of anomalous crustal conductivity in the Alai basin have been drawn.

Magnetotelluric sounding, geoelectric model, electrical conductivity, seismicity, lithosphere, Pamir, Tien Shan

ВВЕДЕНИЕ

Изучением глубинной структуры земной коры и верхней мантии внутриконтинентального орогена Тянь-Шаня и сопредельных территорий Научная станция РАН (НС РАН) занимается более 35 лет, о чем свидетельствуют многочисленные публикации [Баталев и др., 1989, 1993, 2011; Трапезников и др., 1997; Рыбин и др., 2001, 2005; Макаров и др., 2010; Рыбин, 2011; и др.]. Основная роль в изучении глубинного строения Тянь-Шаня принадлежит методам МТ/МВ-зондирований, что позволяет получить информацию о распределении геоэлектрических неоднородностей до глубин нижней коры—верхней мантии [Трапезников и др., 1997; Bielinski et al., 2003; Park et al., 2003; Бердичевский и др., 2010], достаточно надежно определить поведение глубинных разломных зон в земной коре [Баталева, 2005; Баталева и др., 2005, 2006а,б; Рыбин и др., 2008; Баталев и др., 2013] и сделать выводы о природе электропроводности [Трапезников и др., 1997; Рыбин, 2011; Баталев, 2013]. На основе полученных результатов была построена глубинная геоэлектрическая модель литосферы Центрального Тянь-Шаня и выполнено

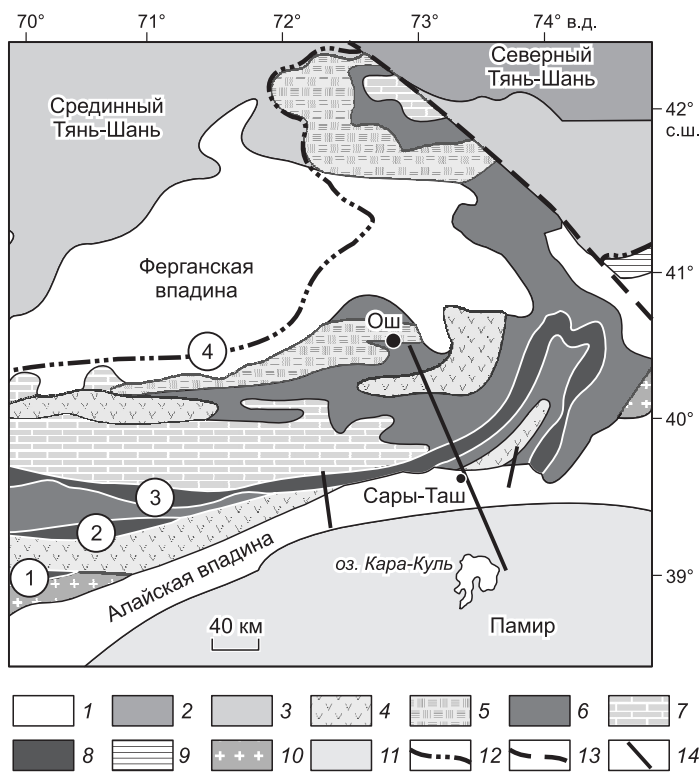


Рис. 1. Тектонические элементы в структуре Памиро-Алайской зоны, по [Леонов, 2012].

1 — мезозойско-кайнозойский чехол обрамления складчато-покровного сооружения Тянь-Шаня; 2 — Северный Тянь-Шань; 3 — Срединный Тянь-Шань; 4—9 — Южный Тянь-Шань: 4 — выходы пород внутрибассейновых вулканических гряд (параавтохтонные), 5 — выходы пород внутрибассейновых вулканических гряд в аллохтонном залегании, 6 — выходы пород относительно глубоководных прогибов, склонов вулканических поднятий и склонов мелководных отмелей, 7 — выходы пород чехла микроконтинентов, 8 — зоны концентрированной деформации, 9 — структуры Южного Тянь-Шаня нерасчлененные; 10 — Сулутерекский и Южно-Гиссарский массивы; 11 — структуры Памира; 12 — сутура Палеотуркестанского океана; 13 — Таласо-Ферганский разлом; 14 — существующие профили МТЗ/МВЗ. 1 — Дараут-Курган, 2 — ТРАСЕ-АЛАИ, 3 — Нура. Цифры в кружках: зоны концентрированной деформации: 1 — Каракуль-Зиддинская, 2 — Зеравшанская, 3 — Нуратау-Курганская, 4 — Южно-Ферганский офиолитовый шов.

и др., 1997; Buslov et al., 2004, 2007; Баталева и др., 2004; Рыбин и др., 2005; Макаров и др., 2010; Баталев и др., 2011; Рыбин, 2011; и др.].

Особый интерес в геолого-геофизических исследованиях Центральной Азии представляют вопросы изучения характеристик геодинамической системы взаимодействия двух крупнейших горных сооружений региона: Тянь-Шаня и Памира. Территорию области сближения Памира и Тянь-Шаня будем называть Памиро-Алайской зоной. Эта зона включает в себя Заалайский хребет, высокогорную Алайскую впадину и примыкающие к ней горные хребты Тянь-Шаня, расположенные к югу от Ферганской долины (рис. 1). Следует отметить, что геоэлектрические исследования на территории Алайской впадины проводились в несколько этапов — ее территория достаточно интенсивно исследовалась во второй половине XX в. различными электроразведочными методами с целью изучения неотектонической структуры [Белоусов, 1997]. Работы выполнялись Алайской партией Киргизской геофизической экспедицией, зондирования проводились до глубин 3—8 км, что позволило выявить главные особенности геологического строения верхней части разреза. Результаты этих работ были частично использованы для построения региональных геологических разрезов. Следующий этап исследований был связан с проведением в 90-х годах прошлого столетия глубинных электромагнитных исследований методом МТЗ с помощью станций МТ-ПИК, разработанных в ИС РАН. Было выполнено 19 зондирований на двух профилях, однако дальнейшие работы пришлось отложить. Новый этап исследований связан с реализацией проекта ТРАСЕ, который предусматривал выполнение комплекса глубинных геофизических исследований, включая и электромагнитные зондирования. Отличительной особенностью проведенных работ является использование современной высокоточной цифровой широкополосной измерительной аппаратуры Phoenix MTU-5, которая произвела настоящую революцию в электроразведочных методах, использующих переменные электромагнитные поля благодаря своей точности, малой энергоёмкости, высокой производительности, помехозащищенности и уровню автоматизации.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПАМИРО-АЛАЙСКОЙ ЗОНЫ

Регион исследования располагается в области сочленения двух складчатых поясов — Центрально-Азиатского (каледонско-герцинского) и Альпийско-Гималайского (киммерийско-альпийского) и в силу сложности тектонического строения и эволюции является объектом неослабевающего интереса ученых на протяжении длительного времени. В постпалеозойской истории Тянь-Шаня принято выделять два этапа — платформенный (юра—палеоген) и орогенный (неоген—четвертичный). Современная тектоническая структура региона является результатом последовательного латерального наращивания и консолидации континентальной литосферы, а также перманентной активизации ранее возникших шов-

ных структур и наложенных деформаций реологически неоднородных массивов горных пород в изменяющихся динамических условиях. В целом консолидация фундамента Памиро-Гиссаро-Алайского района связана с герцинской эпохой, однако преобладающие здесь субширотные простирания главных структурных элементов являются результатом наложения фронта киммерийско-альпийской дуговой внутриплитной коллизионной структуры Памирского синтаксиса на систему мегаскладок и сдвигов того же простирания герцинид Тянь-Шаня [Буртман, 2012]. Структуры поздней активизации максимально проявлены в Заалайском хребте и Алайской впадине, которая вдоль дуги Северо-Памирского надвига соединяется с более широкой Таджикской депрессией. Главную роль в формировании структуры впадины, основными элементами которой являются Центральный грабен, Северный и Южный борты, сыграл неоген-четвертичный этап с характерными большими амплитудами и высоким градиентом вертикальных и горизонтальных движений. Различие современных структурных планов Памира и Тянь-Шаня, проявленное, в частности, в Таджикской депрессии, предполагает реологическую ослабленность земной коры зоны Памирского синтаксиса, сохраняющуюся и на современном орогенном этапе [Леонов, 2008]. Основные представления о геолого-геофизическом строении зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня на сегодняшний день получены в результате проведения структурно-геологических, палеомагнитных, сейсмических, сейсмологических исследований и изучения современных движений земной коры методами наземной и космической геодезии [Чедия, 1986; Vazhenov, Burtman, 1986; Садыбакасов, 1990; Coutand et al., 2002; и др.]. Результаты этих работ надежно определяют характеристики приповерхностных структур, но исследований последних лет, связанных с детальным изучением глубинного строения Памиро-Гиссаро-Алайской зоны, крайне мало. Необходимо отметить, что важным элементом глубинной структуры литосферы Памиро-Алайской зоны являются зоны разломов, которые, как правило, уверенно проявляются в геоэлектрических разрезах, построенных при проведении электроразведочных работ. В этой ситуации ценную информацию могут дать детальные МТЗ, их результаты и положены в основу настоящей работы.

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАМИРО-АЛАЙСКОЙ ЗОНЫ

С помощью МТЗ можно определить удельное электрическое сопротивление Земли, т. е. параметр, который особенно чувствителен к наличию фаз с низким сопротивлением, таким как флюиды, частичные расплавы или соединения металлов. Общеизвестно, что электропроводность среды характеризует не только ее вещественный состав и реологические свойства, но и в какой-то степени способна отражать процессы, происходящие на различных пространственно-масштабных уровнях: разрушение верхней коры, гидратация и дегидратация горных пород, геотермальная циркуляция, тепломассоперенос, частичное плавление и т.д. Таким образом, полученные на основе МТ-данных геоэлектрические разрезы литосферы исследуемого региона позволят проследить развитие разломных зон по глубине, определить характеристики областей повышенной пористости, флюидонасыщенности и частичного плавления, а также предоставляют дополнительную информацию для геодинамических построений [Рыбин, 2011].

Основные методы исследования в магнитотеллурике — численное моделирование и инверсия электромагнитных полей в 2D/3D неоднородных средах. Решения обратной задачи электромагнитных зондирований основаны на методах минимизации функционала невязки в объединенном пространстве инвертируемых данных и оптимизируемых параметров модели с использованием идей тихоновской регуляризации, робастной статистики невязок, нелинейной минимизации Гаусса—Ньютона или сопряженных градиентов. Для реализации такого подхода к количественной интерпретации данных МТЗ-МВЗ использовалась программа двумерной инверсии Макки [Rodi, Mackie, 2001]. Принципиальными элементами инверсии массива МТ-данных являются: 1) учет влияния рельефа поверхности наблюдения на электромагнитные отклики, 2) увеличение используемых в инверсии погрешностей данных пропорционально количественным мерам 3D-искаженности и 3) робастное осреднение набора приемлемых решений задачи инверсии при построении итоговой модели [Варенцов, 2011; Рыбин, 2011].

Методика МТ-исследований, проводимых в зоне сочленения Памира и Алая, предусматривала выполнение МТЗ, основанного на одновременных измерениях временных вариаций электрического и магнитного полей Земли, и МВЗ, в котором используются временные вариации только магнитного поля, включая обработку экспериментального материала непосредственно на пунктах наблюдения. Отличительной особенностью настоящих работ являлось применение разнотипной аппаратуры (Phoenix и GIPP) в двухчастотных диапазонах — глубинном и широкополосном. Для обработки данных, полученных станциями Phoenix MTU-5, использовалась программа SSMT2000, разработанная специалистами той же фирмы. Программа обработки основана не на методе узкополосной фильтрации, а на корреляционном методе, в котором рассчитываются функции взаимной корреляции всех компонент электромагнитного поля. Затем проводится Фурье-преобразование, в результате чего получаются спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса и матрицы Визе.

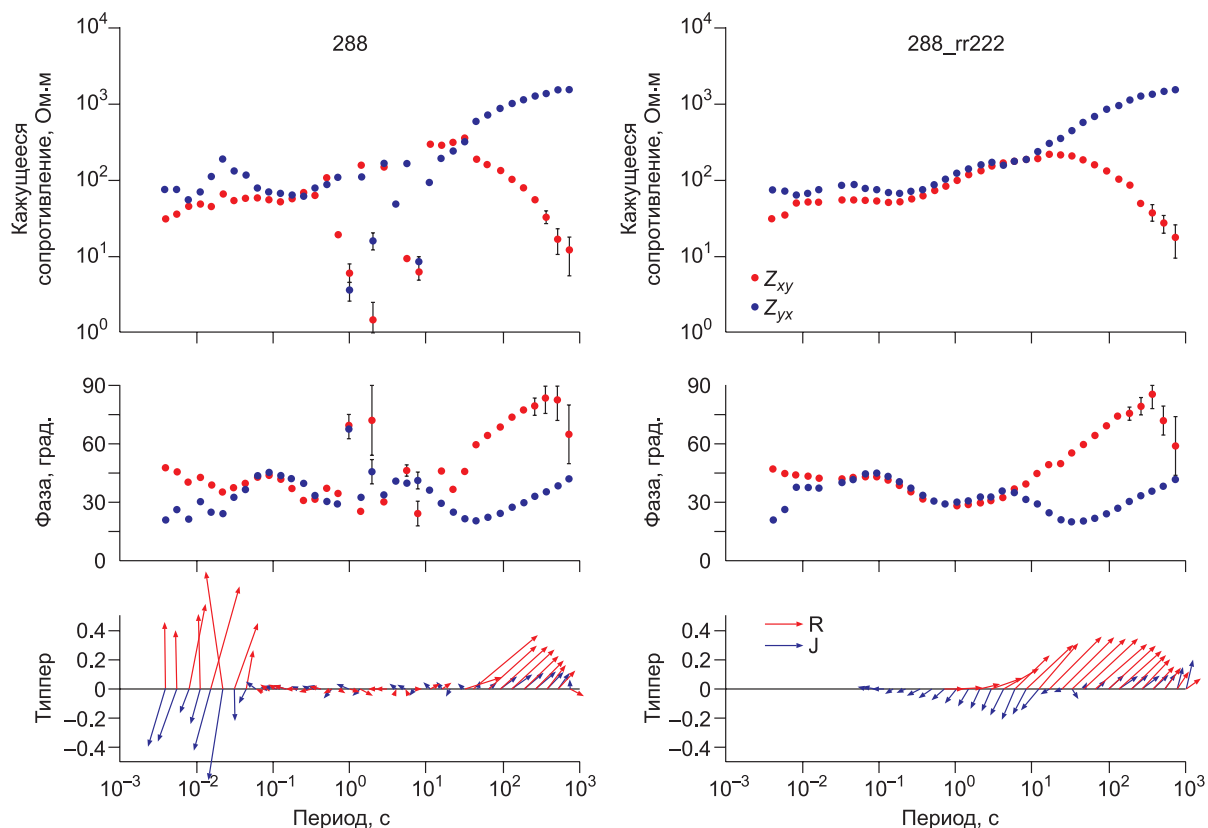


Рис. 2. Пример реализации режимов обработки «local» (левая часть рисунка) и «remote reference» (правая часть) для амплитудных кривых ρ_r , фазы импеданса и типперов для широтного и меридионального направлений по профилю TIPAGE-ALAI.

Цветными стрелками показаны реальная (R) и мнимая (J) части вектора Визе.

За последние годы в зоне Памиро-Гиссаро-Алая силами ИС РАН было выполнено несколько магнитотеллурических профилей: Дараут-Курган, TIPAGE-ALAI и Нура (см. рис. 1), секущих в субмеридиональном направлении основные тектонические элементы Алайской впадины и ее горного обрамления в области наибольшего сближения Памира и Тянь-Шаня. Шаг по профилям составлял около 0.5—0.8 км, общее количество зондирований по профилю Дараут-Курган составило 9 TIPAGE-ALAI — 111 и Нура — 22. В режиме МТЗ и ГМТЗ регистрировались пять компонент естественного электромагнитного поля Земли: E_x , E_y , H_x , H_y , H_z . Электрические сигналы регистрировались с помощью диполей длиной 50 м, разнесенных ортогонально в азимутах север—юг и восток—запад. Определение координат пунктов наблюдений осуществлялась с помощью GPS. Для повышения качества результатов МТЗ-измерений использовалась методика синхронных измерений.

Предполагается, что для зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня основные изменения в распределении электрических свойств литосферы следует ожидать в меридиональном направлении [Варенцов, 2011], т. е. вдоль линий профилей МТ/МВ-исследований и, соответственно, вкрест простирания геолого-тектонических структур региона (см. рис. 1). Однако необходимо оценить пространственную неоднородность геоэлектрической структуры изучаемой области и в широтном направлении. Это было сделано с использованием результатов МТ/МВ-зондирований по серии профилей, выполненных на территории Памиро-Алайской зоны.

Методика обработки данных станций GIPP. При проведении работ на основном профиле TIPAGE-ALAI применяли аппаратный комплекс GIPP, разработанный в Центре наук о Земле (г. Потсдам). Для обработки данных, полученных комплексом GIPP, использовался стандартный пакет программ EMERALD, результаты и интерпретация МТ-исследований, выполненных вдоль профиля TIPAGE, приведены в работах [Sass et al., 2011, 2014]. Программа обработки основана на расчете функции взаимной корреляции всех компонент поля. Далее в расчетах проводится Фурье-преобразование, в результате чего формируются спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса.

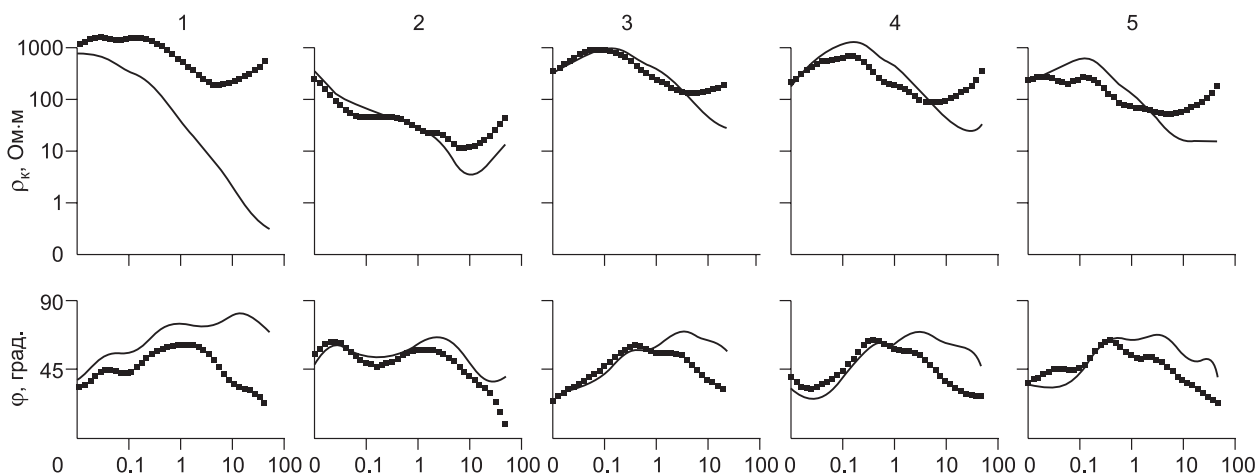


Рис. 3. Пример амплитудных кривых $\rho_k(\sqrt{T})$ и фазы импеданса $\varphi(\sqrt{T})$ для широтного (сплошные линии) и меридионального направлений (пунктир) по профилю Нура.

По горизонтальной оси отложен \sqrt{T} ($c^{1/2}$). Показаны пункты зондирования (1—5), пронумерованные, начиная с севера на юг.

Комплекс программ для обработки данных МТ/МВ-зондирований, которые были получены в исследуемом регионе с помощью оборудования GIPP, включает в себя стандартную для этой аппаратуры обработку в режимах «local» и «remote reference», последний, в свою очередь, реализует современные алгоритмы спектрального анализа (рис. 2). Полученные при помощи этого мощного современного аппаратурного комплекса компоненты тензора импеданса и геомагнитного типпера составили входной набор данных для дальнейшего численного моделирования.

Методика обработки данных аппаратуры Феникс MTU-5. С началом широкого применения в МТ-исследованиях Тянь-Шаня аппаратуры Феникс MTU-5 для обработки данных, полученных этими станциями, стала использоваться программа SSMT2000, разработанная специалистами той же фирмы. Программа обработки основана на корреляционном методе, а не на узкополосной фильтрации, который очень широко используется в других программных комплексах. В нем рассчитываются функции взаимной корреляции всех компонент поля. Далее проводится Фурье-преобразование, в результате чего получаются спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса и матрицы Визе (рис. 3).

Программный комплекс обработки данных МТ/МВ-зондирований, полученных в исследуемом регионе аппаратурой Феникс MTU-5, включает в себя стандартную для этой аппаратуры программу SSMT2000 в режимах «local» и «remote reference» (подобно алгоритму, используемому в программном комплексе EMERALD), реализующей современные алгоритмы спектрального анализа. Дополнительно для подавления промышленных помех и сглаживания передаточных функций в низкочастотном диапазоне используется программа MT-Corrector, разработанная сотрудниками геофизической компании «Северо-Запад», г. Москва. В процедуре углубленной обработки для окончательного отбора импедансных оценок используются все решения с отдельным анализом импедансных и адмитансных оценок, а затем проводится отбраковка наиболее «зашумленных» оценок с последующим объединением и сглаживанием наиболее достоверных решений для результирующих кривых (рис. 4).

Программный пакет MT-Corrector применяются нами для просмотра, оценки и редактирования частотных зависимостей компонент тензора импеданса. Также данный программный пакет позволяет выполнять проверку дисперсионных соотношений второго рода, которые характеризуют связь ρ_k и фаз импеданса [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. MT-Corrector позволяет вычислить фазовые кривые по соответствующим значениям частотных зависимостей модулей импедансов. Величина отклонения сплайна на наблюдаемой и расчетной фазовых кривых характеризует степень выполнения дисперсионных соотношений. Для профиля Нура в пределах точности наблюдений выполняются дисперсионные соотношения второго рода практически во всём частотном диапазоне наблюдений (см. рис. 4), что обеспечивает снижение погрешности RMS при дальнейшей процедуре 2D-инверсии данных.

Оценка точности построенных геоэлектрических моделей. В моделях, возбуждаемых электрическим полем, поляризованным вкrest оси геоэлектрической однородности (ТМ-мода), МТ-передаточные функции для большинства узлов сетки имеют невязки, не превышающие 20 % по модулю и 6° по фазе.

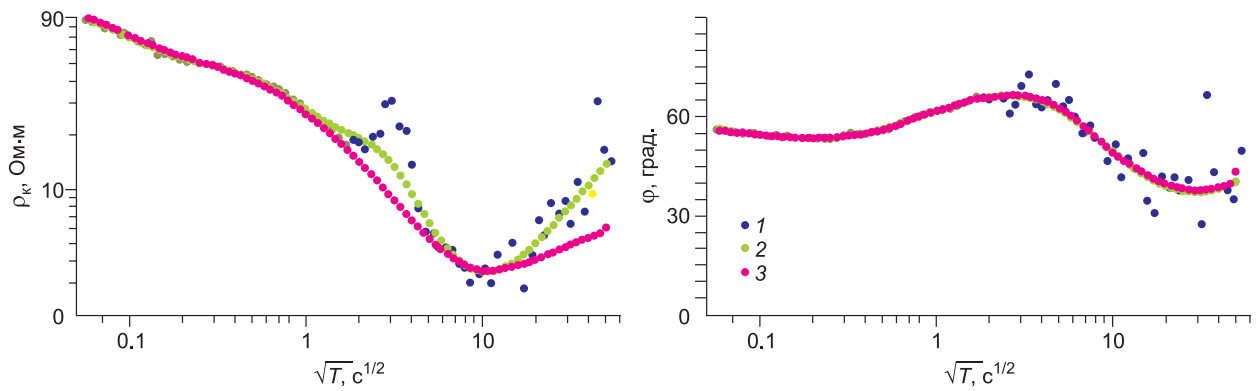


Рис. 4. Пример подавления промышленных помех и сглаживания передаточных функций кривых ρ_k (верхняя часть рисунка) и фаз импеданса (нижняя часть рисунка) и проверка выполнения дисперсионных соотношений второго рода, связывающего амплитудную кривую ρ_k и фазу импеданса для пункта № 2 профиля Нура с помощью программы MT-Corrector.

1 — точки исходной кривой, 2 — «сглаженная» кривая, 3 — аппроксимационные сплайны с учетом дисперсионных соотношений.

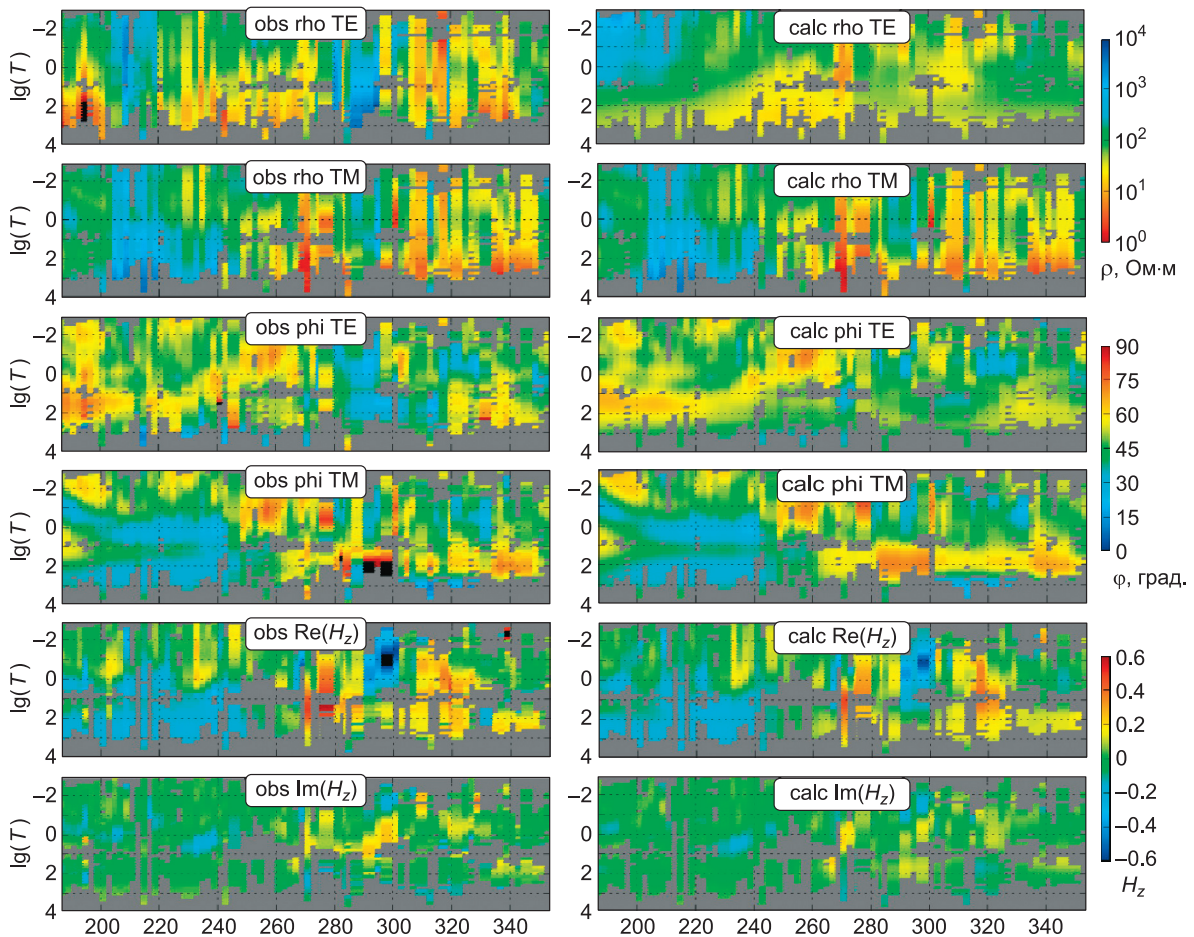


Рис. 5. Сравнение параметров наблюдаемых (левая часть рисунка) и модельных (правая часть рисунка) значений ρ_k , фаз импеданса и типпера.

Горизонтальная ось — номера пунктов зондирования, вертикальная ось — логарифм периода.

Для моделей, возбуждаемых электрическим полем, поляризованным вдоль оси геоэлектрической однородности (ТЕ-мода), МТ-передаточные функции имеют более высокие невязки, прежде всего, из-за того, что выбранные весовые коэффициенты для этой моды значительно превышают предел погрешности ТМ-моды. В модели получены небольшие величины МВ-передаточной функции (типперов), которые хорошо согласуются с малыми значениями (< 0.1) экспериментальных данных, но ошибки достаточно велики из-за низкого отношения «сигнал—шум» в исходных данных (рис. 5).

Построение геоэлектрической модели. В результате выполненного комплекса зондирований на гетерогенной сети наблюдений был сформирован многокомпонентный ансамбль оценок передаточных операторов (импеданса и типпера), включающий одноточечные (local) и двухточечные (remote reference) оценки передаточных функций в объединенном диапазоне периодов $T = 0.001—10000$ с. На основе этих данных была выполнена количественная интерпретация — 2D-инверсия с помощью программы Роди—Макки [Rodi, Mackie, 2001], реализующей метод нелинейных сопряженных градиентов, и построена двумерная геоэлектрическая модель TIPAGE-ALAI, представляющая собой структурно-геоэлектрический разрез земной коры в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня вдоль меридиана 73.4° в.д. [Матюков, 2013].

Входной ансамбль инвертируемых данных включал в себя наблюдаемые значения ρ_k и фазы импеданса для двух поляризаций электромагнитного поля, а также значения геомагнитного типпера в (Re, Im) представлении, заданные в 78 точках на профиле длиной около 170 км для 30 периодов зондирования в интервале от 1000 Гц до 2000 с.

Сеточная аппроксимация модели имеет 228 горизонтальных узлов и 128 слоев с латеральными изменениями, по размеру меньшими, чем коэффициент 1.07 между любыми соседними ячейками, для того, чтобы удовлетворить ограничениям программы 2D-инверсии. Большинство слоев предназначены для адекватного представления в модели топографического рельефа, изменения высот которого вдоль линии профиля составляют около 1.5 км. Такая детальная аппроксимация рельефа необходима для обеспечения подбора данных на высоких частотах (от 100 Гц). После нескольких тестовых расчетов инверсии было определено значение параметра регуляризации $\tau = 3.0$. Пределы погрешностей (весовые коэффициенты) инвертируемых данных были установлены следующим образом: модуль ρ_k (ТЕ-мода) — 30 %, модуль ρ_k (ТМ-мода) — 30 %, фаза импеданса (ТЕ-мода) — 5° , фаза импеданса (ТМ-мода) — 5° , типпер (H_z) — 0.1 %.

Стартовая модель для 2D-инверсии представляет собой среду с удельным электрическим сопротивлением в 100 Ом·м до глубин 100 км. Следует отметить, что плотность и геометрия сеточной аппроксимации в процедуре автоматизированной инверсии, а также включение всех ячеек разбиения в оптимизационный подбор обеспечивают плавность построения геоэлектрических структур и отсутствие ограничений для различных гипотез о глубинном строении региона исследования. Далее была выполнена совместная бимодальная 2D-инверсия многокомпонентного ансамбля данных, включающего амплитуды ρ_k , фазы импеданса и типперы, для профиля ALAI-TIPAGE. В результате выполненных 300 внутренних итераций в процессе совместной параллельной инверсии всего входного ансамбля данных погрешность подбора по всем компонентам (RMS-невязка) составила 1.52.

На геоэлектрической модели по профилю TIPAGE-ALAI (рис. 6) в южной части разреза (в районе оз. Кара-Куль) выделяется проводник (1) с сопротивлением до 2—3 Ом·м на глубинах от 15 до 30 км. Под Заалайским хребтом выявляется проводящая зона (2), соответствующая Главному Памирскому надвигу. Также определяется мощная субвертикальная проводящая зона (3) под Алайской впадиной, достигающая глубины 100 км и имеющая несколько ответвлений в самой верхней части разреза до глубин 5—10 км. В северной части разреза присутствует субгоризонтальная проводящая структура (4), которая начинается под северным склоном Алайского хребта на глубинах порядка 80 км и заканчивается под Ферганской впадиной, поднимаясь до глубин 15—20 км. Аналогичным образом с использованием программы Роди—Макки [Rodi, Mackie, 2001] была выполнена двумерная инверсия наблюдаемых данных по профилям Дараут-Курган и Нура. Результаты инверсии представлены на рис. 7. На всех полученных профильных разрезах трассируется линейная субширотная проводящая структура в интервале глубин 0—25 км, соответствующая зоне Главного Памирского надвига. Причем максимальная электрическая «активность» (пространственные размеры и проводимость) этого продольного проводника определяется в западном и центральном сечениях (профили Дараут-Курган и TIPAGE). В восточной части Алайской зоны (сечение по профилю Нура) наблюдается уменьшение ширины этой проводящей структуры и ее проводимости. Общая субвертикальная направленность проводящей зоны, пространственно приуроченная к Главному Памирскому надвигу, сохраняется практически без изменений во всех трех рассматриваемых сечениях.

О природе коровой проводимости. Важнейшей задачей выполненных исследований является выяснение природы аномалий коровой электропроводности. Интерпретация МТ-данных в комплексе с результатами других глубинных геофизических исследований и лабораторных экспериментов позволя-

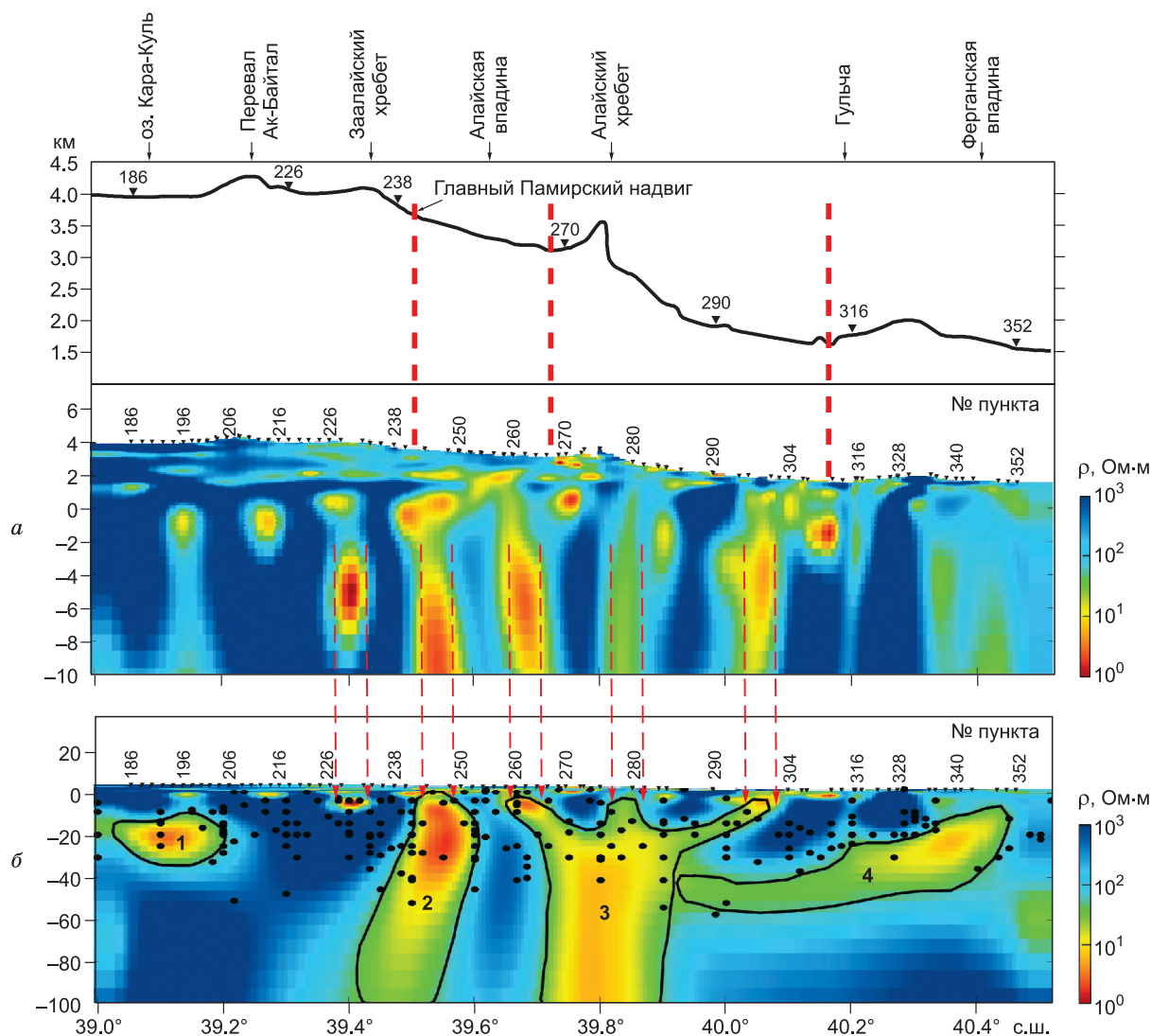


Рис. 6. Геоэлектрический разрез профильной 2D-модели TIRAGE-ALAI.

a — верхняя часть разреза, *б* — полный разрез. Темными кружками показаны гипоцентры землетрясений $K > 11$ в полосе шириной ± 50 км от линии профиля (данные сейсмологической сети Института сейсмологии НАН КР за период наблюдений 1978—2013 гг.). Всего 102 события.

ет приблизиться к решению этой задачи на различных пространственно-масштабных уровнях литосферы Центрального Тянь-Шаня. Так, например, понижение сейсмических скоростей и одновременное увеличение электропроводности в литосфере обычно интерпретируется наличием волновода. Именно такой литосферный проводящий слой, расположенный в средней—нижней части земной коры Северного Тянь-Шаня, был установлен МТ-зондированиями в конце восьмидесятых годов прошлого столетия [Батаев и др., 1989]. Позднее коровый проводящий слой был обнаружен под территорией всего Центрального Тянь-Шаня, отчасти этому способствовало его относительно неглубокое залегание (25—45 км) и значительный контраст электропроводности [Трапезников и др., 1997]. В результате проведенных исследований Научной станции РАН к настоящему времени установлено, что коровый проводящий слой спорадически распространен под территорией всего Центрального Тянь-Шаня, глубина его залегания варьирует от 45 км (север) до 20 км (юг), а значения суммарной продольной электропроводности меняются в направлении с севера на юг от 450 до 2000 См [Рыбин и др., 2005]. Особенностью геоэлектрической модели зоны сочленения Тянь-Шаня и Памира является зона аномально низкого сопротивления, приуроченная к северной части Алайской впадины и Алайскому хребту. Высокая проводимость горных пород, прежде всего, может быть обусловлена наличием в них минералов, обладающих электронной проводимостью, наиболее распространенными представителями таких пород являются угле-

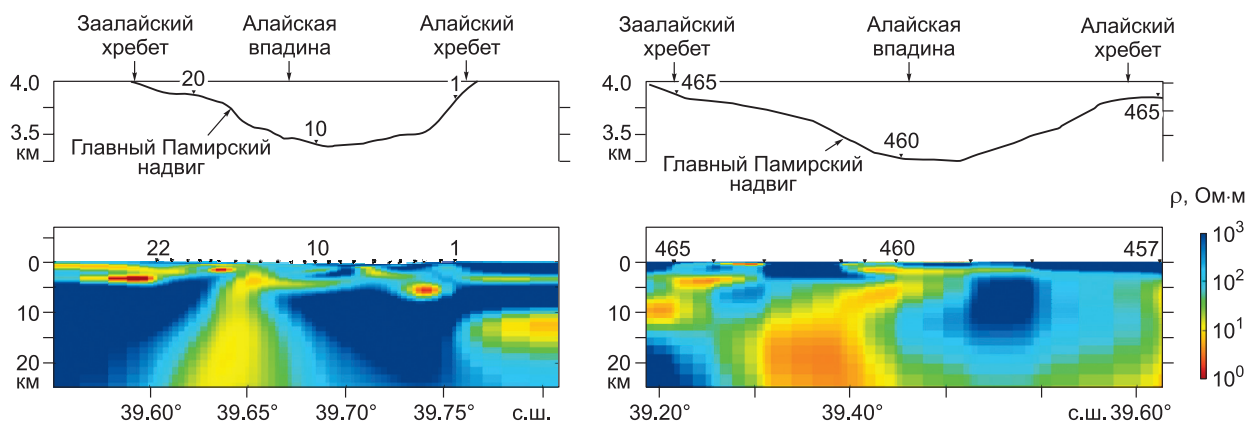


Рис. 7. Геоэлектрические разрезы вдоль локальных профилей Нура (слева) и Дараут-Курган (справа).

рудосодержащие сланцы, сульфидсодержащие гнейсы, а также метаморфические породы, прошедшие стадию метаморфизма низких давлений, например, серпентинизированные перидотиты [Кулик, 2009]. Несмотря на то обстоятельство, что электропроводящие объекты в общей массе горных пород имеют незначительное распространение, в разломных зонах и зонах с повышенной проницаемостью среды их влияние на проводимость верхней части земной коры можно рассматривать как один из главных факторов, определяющих электрическую структуру геологической среды. Для Южного Тянь-Шаня существуют доказательства присутствия графитизированных пород в верхнекоровых образованиях [Бабаджанов и др., 1986; Аширматов и др., 1990]. Графит может служить в роли «смазки» в тектоническом процессе или возникать в результате тектонических процессов. Аномалии электропроводности часто связаны с шовными зонами, например, линией Николаева [Баталева и др., 2006б]. Вместе с тем не исключается и наличие флюидной проводимости, что весьма характерно для современных тектонически активных областей с повышенной сейсмичностью.

Сейсмичность Памиро-Алая. Территория Памиро-Тяньшаньского региона, включая рассматриваемый объект исследования — Памиро-Алайскую зону, почти целиком располагается в области 8—9 балльной сейсмичности [Тектоническая карта..., 1987]. В течение последних ста лет здесь произошло более 15 землетрясений выше 8 баллов. Анализ карты распределения очагов землетрясений позволяет выявить определенную закономерность в распределении сейсмического поля на этой территории. С запада и с севера она оконтурена полосой, где не зарегистрировано сейсмических событий более 7 баллов. Основная масса эпицентров сильных землетрясений с $M > 5$ закономерно вытягивается в виде двух сейсмогенерирующих зон — Северо-Тяньшаньской и Южно-Тяньшаньской (Гиссаро-Кокшаальской), приуроченных соответственно к северным и южным участкам контрастного сочленения орогена и ограничивающих его с севера — Туранской плитой и Казахским щитом, а с юга — горным массивом Памира и Таримской платформой. Сейсмогенные зоны пространственно приурочены к участкам взаимодействия этих крупнейших тектонических элементов геодинамической системы Центральной Азии. При этом Южно-Тяньшаньская сейсмоактивная зона является аномально высокосейсмичной на участке сочленения Памира и Тянь-Шаня [Юдахин и др., 1991].

Наиболее сильными землетрясениями, произошедшими в Памиро-Алайской зоне, являются Маркансуйское (11.08.1974, $\varphi = 39.40^\circ$ с.ш., $\lambda = 73.80^\circ$ в.д., $M = 7.3$), Дараут-Курганское (01.11.1978, $\varphi = 39.40^\circ$ с.ш., $\lambda = 72.60^\circ$ в.д., $M = 6.9$), Нуринское (05.10.2008, $\varphi = 39.50^\circ$ с.ш., $\lambda = 73.64^\circ$ в.д., $M = 6.9$) [Мамыров, 2014]. Для получения более полной оценки сейсмичности исследуемой территории проведем анализ данных о фоновой (или слабой) сейсмичности. Рассмотрим карту эпицентров землетрясений Памиро-Алайской области (рис. 8), построенную по материалам каталога землетрясений Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики (ИС НАН КР). На рис. 8 отчетливо проявляется неоднородность пространственного распределения сейсмичности региона, при этом наблюдается значительная концентрация землетрясений в узкой полосе вдоль южного борта Алайской впадины. Эта сейсмоактивная зона пространственно приурочена к участку сочленения Тянь-Шаня и Памира.

На рис. 9 показано широтное распределение по глубинам очагов землетрясений энергетического класса $K > 6$, эпицентры которых представлены на рис. 8. В целом можно отметить, что оно достаточно неравномерно и наибольшее число таких землетрясений приурочено к интервалу глубин 7—20 км.

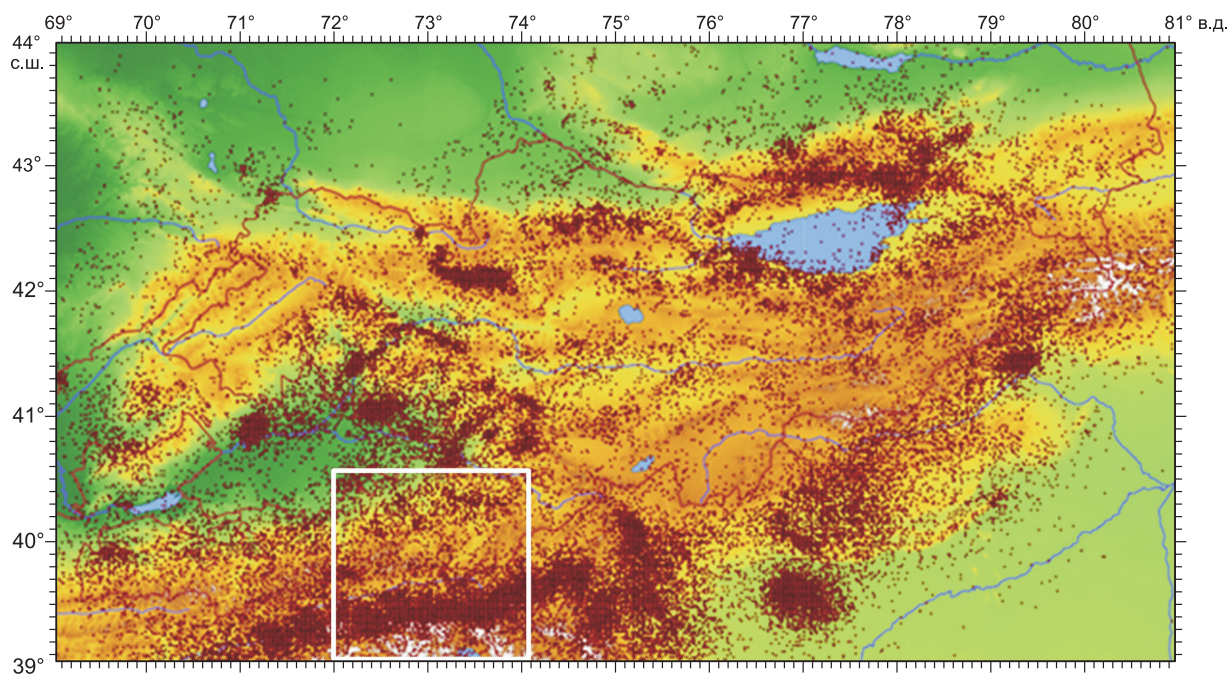


Рис. 8. Карта распределения эпицентров землетрясений энергетического класса ($K \geq 6$) для территории Памиро-Алайского региона за период наблюдений 1978—2013 гг. (по данным сейсмологической сети ИС НАН КР).

Всего 33631 событие.

Анализ взаимосвязи параметров геоэлектрической структуры и пространственного распределения сейсмичности. На сегодняшний день анализ связи параметров сейсмоактивных зон с характеристиками геофизического поля электрических неоднородностей для территории Тяньшаньского региона был осуществлен целым рядом исследователей, например, [Киссин, Рузайкин, 1997; Брагин и др., 2001; Зубович и др., 2001; Рыбин, 2011]. Авторами работы [Киссин, Рузайкин, 1997] показано, что большинство очагов коровых землетрясений Центрального Тянь-Шаня тяготеют к субвертикальным проводящим зонам, имитирующим флюидонасыщенные разломы.

В работе [Брагин и др., 2001] на основе сопоставления глубинных разрезов поля слабой сейсмичности и геоэлектрической структуры приповерхностных разломных зон для территории Бишкекского геодинамического полигона (Чуйская впадина и Киргизский хребет) был сделан вывод о том, что нет веских оснований приурочивать распределение гипоцентров землетрясений к приповерхностным разломным зонам для исследуемой территории.

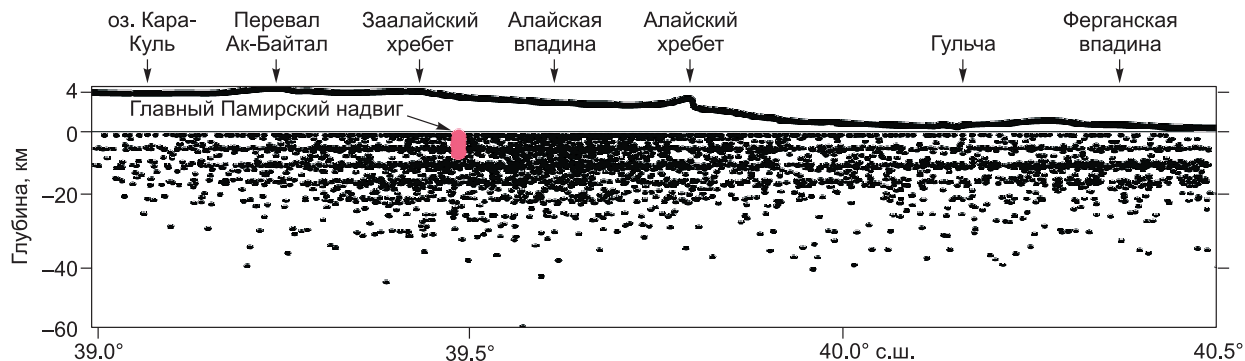


Рис. 9. Широтное распределение очагов землетрясений с $K > 6$ по глубинам в полосе шириной ± 50 км от линии профиля TIRAGE-ALAI (по данным сейсмологической сети ИС НАН КР за период наблюдений 1978—2013 гг.).

Всего 5631 событие.

К интересным выводам пришли авторы работы [Зубович и др., 2001], в которой рассматривалось поле деформаций, глубинное строение земной коры, пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня и геометрия поверхности корового проводящего слоя, обнаруженного по данным МТЗ под Тянь-Шанем. Установлено, что наиболее интенсивные горизонтальные деформации земной поверхности соответствуют участкам повышенных градиентов глубины залегания кровли проводящего слоя и совпадают с областями повышенной сейсмичности. При этом показано, что гипоцентры почти всех сейсмических событий были расположены выше слоя повышенной электропроводности (из 7621 землетрясений с энергетическим классом $K \geq 6$ лишь 151 произошло в коровом проводящем слое, а 14 — ниже него). Такое распределение гипоцентров связано с хрупкой природой верхней части земной коры по сравнению со средней и нижней ее частями, которые являются более пластичными.

В работе [Рыбин, 2011] выявлено, что положение землетрясений энергетического класса $K > 10$, произошедших на территории Бишкекского геодинамического полигона, может быть объяснено геоэлектрическими особенностями земной коры: наличием высоких градиентов сопротивления, обусловленных высокоомными телами и зонами низких сопротивлений, и присутствием нижнекорового проводящего слоя и проводящего «канала», соединяющего нижние и верхние структуры. Такая геоэлектрическая структура создает благоприятные условия для диффузии флюида из нижнекорового горизонта к земной поверхности.

На рис. 6 показаны построенный геоэлектрический разрез литосферы исследуемой Памиро-Алайской области по профилю TYPAGE-ALAI и распределение очагов землетрясений по глубинам в полосе шириной ± 50 км от линии профиля. Практически все очаги землетрясений с $K > 11$ расположены над проводящим горизонтом. Очаги землетрясений локализуются в пределах высокоомного слоя и выступов субвертикальных проводящих тел, проникающих в верхнюю кору, концентрируясь преимущественно вблизи границ между выступами проводящих тел и соседними высокоомными блоками, а также на участках с резкими перепадами глубин проводящего слоя. Таким образом, контакты между блоками или телами с контрастными геоэлектрическими параметрами можно рассматривать как вероятные объекты повышенной сейсмической активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате выполненных исследований удалось установить основные черты глубинного строения зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня — Алайской впадины, для большей части которой установлено наличие зоны повышенной коровой проводимости. В средней—нижней коре северной части профиля TYPAGE-ALAI отчетливо выделяется электропроводящий слой, имеющий несколько ответвлений в верхней части разреза. Южная часть этого проводника расположена под северным склоном Алайского хребта на глубинах около 80 км, а к северу эта проводящая структура испытывает подъем до глубин 15—20 км под Ферганской впадиной. Под Алайской впадиной определяется мощная субвертикальная проводящая зона, достигающая глубины 100 км. Зона Главного Памирского надвига в геоэлектрическом разрезе проявляется как глубинный объект с пониженным сопротивлением. Проведен анализ широтного простирания выявленных проводящих объектов в построенных двумерных геоэлектрических разрезах по профилям TYPAGE-ALAI, Дараут-Курган и Нура, секущих Алайскую впадину в поперечном направлении. На всех профильных разрезах трассируется линейная субширотная проводящая структура в интервале глубин 0—25 км, пространственно приуроченная к Главному Памирскому надвику. Также получена оценка ее пространственной неоднородности вдоль простирания — уменьшение мощности и увеличение сопротивления с запада на восток.

Выявлена пространственная корреляция положения гипоцентров землетрясений, произошедших на территории Памиро-Алая, с особенностями геоэлектрической структуры земной коры этого района. Сделан вывод о том, что очаги землетрясений локализуются в градиентных зонах вблизи контактов между блоками или телами с контрастными геоэлектрическими параметрами.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10059) в Научной станции РАН в г. Бишкек.

ЛИТЕРАТУРА

Аширматов А., Ваньян Л.Л., Новосельский И.Н., Шиловский А.П. Основные черты электропроводности земной коры Памира // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1990, № 6, с. 83—85.

Бабаджанов Т.Л., Басов М.Д., Гатина Р.М., Аширматов А.С., Белявский В.В., Каржаув А.Т., Таль-Вирский Б.Б., Дубровский В.Г., Бердичевский М.Н., Яковлев А.Г., Файнберг Э.Б. Южно-Тянь-Шаньская аномалия электропроводности // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1986, № 7, с. 79—90.

- Баталев В.Ю.** Структура и состояние вещества литосферы Центрального Тянь-Шаня (по данным глубинных магнитотеллурических зондирований): Автореф. дис... д.г.-м.н. Новосибирск, 2013, 32 с.
- Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Голланд М.Л., Голубцова Н.С., Кузнецов В.А.** Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований в Чуйской межгорной впадине // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1989, № 9, с. 42—45.
- Баталев В.Ю., Волыхин А.М., Рыбин А.К., Трапезников Ю.А., Финякин В.В.** Строение земной коры восточной части Киргизского Тянь-Шаня по данным МТЗ и ГМТЗ // Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М., Наука, 1993, с. 96—113.
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Егорова В.В., Матюков В.Е., Рыбин А.К.** Геоэлектрическая структура литосферы Центрального и Южного Тянь-Шаня в сопоставлении с петрологическим анализом и лабораторными исследованиями нижнекоровых и верхнемантийных ксенолитов // Геология и геофизика, 2011 (12), с. 2022—2031.
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К.** Глубинное строение западной части зоны Таласо-Ферганского разлома по результатам магнитотеллурических зондирований // Литосфера, 2013, № 4, с. 136—145.
- Баталева Е.А.** Глубинная структура крупнейших разломных зон западной части Киргизского Тянь-Шаня и современная геодинамика: Автореф. дис... к.г.-м.н. Новосибирск, 2005, 20 с.
- Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г., Сафронов И.В.** Характеристика литосферы Тянь-Шаня по комплексу геофизических данных // Физические, геофизические и геодинамические исследования в Центральной Азии в начале XXI века. Бишкек, КРСУ, 2004, с. 22—25.
- Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г., Сафронов И.В.** Аномалия электропроводности Таласо-Ферганского разлома и ее геодинамические приложения // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска: материалы пятой казахстанско-российской международной конференции. Алматы, Умит, 2005, с. 89—95.
- Баталева Е.А., Буслов М.М., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Сафронов И.В.** Аномалии электропроводности зоны Таласо-Ферганского разлома и геодинамическая интерпретация глубинной структуры Юго-Западного Тянь-Шаня // Геология и геофизика, 2006а, т. 47 (9), с. 1036—1042.
- Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Сафронов И.В.** Новые данные о глубинном строении разломной зоны линии Николаева по результатам магнитотеллурического зондирования // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке. Вып.1. М., Бишкек, 2006б, с. 70—78.
- Белоусов В.И.** Геологическое строение Алая по данным глубинных вертикальных электрических зондирований // Изв. вузов. Геология и разведка, 1997, № 4, с. 3—14.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.** Модели и методы магнитотеллурики. М., Научный мир, 2009, 680 с.
- Бердичевский М.Н., Соколова Е.Ю., Варенцов Ив.М., Рыбин А.К., Баглаенко Н.В., Баталев В.Ю., Голубцова Н.С., Матюков В.Е., Пушкарев П.Ю.** Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: анализ магнитотеллурических и магнитовариационных откликов вдоль геотраверса НА-РЫН // Физика Земли, 2010, № 8, с. 36—53.
- Брагин В.Д., Баталев В.Ю., Зубович А.В., Лобанченко А.Н., Рыбин А.К., Трапезников Ю.А., Щелочков Г.Г.** О качественных связях современных движений с геоэлектрическим разрезом земной коры Центрального Тянь-Шаня и распределением сейсмичности // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (10), с. 1610—1621.
- Буртман В.С.** Тянь-Шань и Высокая Азия. Геодинамика в кайнозое. М., ГЕОС, 2012, 188 с.
- Варенцов Ив.М.** Прагматическая 2D инверсия синхронных ансамблей МТ/МВ откликов // Материалы V Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по ЭМ зондированиям Земли. Т. 2. СПб., СПбГУ, 2011, с. 17—21.
- Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Мосиенко О.И., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю.** Поле деформаций, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (10), с. 1634—1640.
- Киссин И.Г., Рузайкин А.И.** Соотношение между сейсмоактивными и электропроводящими зонами в земной коре Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли, 1997, № 1, с. 21—29.
- Кулик С.Н.** Графит в формировании электропроводности земной коры // Труды УкрНДМИ НАН Украины, 2009, № 5, с. 140—148.
- Леонов М.Г.** Тектоника консолидированной коры. М., Наука, 2008, 468 с.
- Леонов М.Г.** Внутриплитные зоны концентрированной деформации: тектоническая структура и особенности эволюции // Геотектоника, 2012, № 6, с. 3—26.
- Макаров В.И., Алексеев Д.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Беляев И.В., Брагин В.Д., Дергунов Н.Т., Ефимова Н.Н., Леонов М.Г., Мунирова Л.М., Павленкин А.Д., Рёкер С., Рослов Ю.В.,**

Рыбин А.К., Щелочков Г.Г. Поддвиг Тарима под Тянь-Шань и глубинная структура зоны их сочленения: основные результаты сейсмических исследований по профилю MANAS (Кашгар—Сонкёль) // Геотектоника, 2010, № 2, с. 23—42.

Мамыров Э.М. Управляющие параметры соотношений магнитуда—сейсмическая энергия—сейсмический момент коровых землетрясений. Бишкек, Илим, 2014, 94 с.

Матюков В.Е. Глубинное строение зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня по данным магнитотеллурических зондирований: Автореф. дис....к.ф.-м.н., Бишкек, 2013, 26 с.

Рыбин А.К. Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических исследований. М., Научный мир, 2011, 232 с.

Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Ильичев П.В., Щелочков Г.Г. Магнитотеллурические и магнитовариационные исследования Киргизского Тянь-Шаня // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (10), с. 1566—1573.

Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Макаров В.И., Сафронов И.В. Структура земной коры по данным магнитотеллурических зондирований // Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). М., Научный мир, 2005, с. 79—96.

Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (5), с. 445—460.

Садыбакасов И.С. Неотектоника Высокой Азии. М., Наука, 1990, 180 с.

Чедия О.К. Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. Фрунзе, Илим, 1986, 314 с.

Тектоническая карта Киргизской ССР. М-б 1: 500 000. Объяснительная записка. Фрунзе, Илим, 1987, 86 с.

Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Волыхин А.М., Голубцова Н.С., Рыбин А.К. Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли, 1997, № 1, с. 3—20.

Юдахин Ф.Н., Чедия О.К., Сабитова Т.М. Современная геодинамика литосферы Тянь-Шаня. М., Наука, 1991, 192 с.

Bazhenov M.L., Burtman V.S. Tectonics and paleomagnetism of structural arcs of the Pamir-Punjab syntaxis // J. Geodyn., 1986, v. 5, p. 383—396.

Bielinski R.A., Park S.K., Rybin A., Batalev V., Jun S., Sears C. Lithospheric heterogeneity in the Kyrgyz Tien Shan imaged by magnetotelluric studies // Geophys. Res. Lett., 2003, v. 30, № 15, p. 1806, doi: 10.1029/2003GL017455.

Buslov M.M., De Grave J., Bataleva E.A. Cenozoic tectonic and geodynamic evolution of the Tien Shan Mountain belt as response to India-Eurasia convergence // Himalayan J. Sci., 2004, v. 2, № 4, p. 106—107.

Buslov M.M., De Grave J., Bataleva E.A., Batalev V.Yu. Cenozoic tectonic and geodynamic evolution of the Kyrgyz Tien Shan Mountains: A review of geological, thermochronological and geophysical data // J. Asian Earth Sci., 2007, v. 29, p. 205—214.

Coutand I., Strecker M.R., Arrowsmith J.R., Hilley G., Thiede R.C., Korjenkov A. and Omuraliev M. Late Cenozoic tectonic development of the intramontane Alai Valley (Pamir-Tien Shan region, central Asia): An example of intracontinental deformation due to the Indo-Eurasia collision // Tectonics, 2002, v. 21, № 6, p. 1053. doi: 10.1029 / 2002TC001358.

Park S., Thompson S., Rybin A., Batalev V., Bielinski R. Structural constraints in neotectonic studies of thrust faults from the magnetotelluric method, Kochkor Basin, Kyrgyz Republic // Tectonics, 2003, v. 22, № 2, doi:10.1029/2001TC001318 15.

Rodi W.L., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics, 2001, v. 66, p. 174—187.

Sass P., Ritter O., Muñoz G., Rybin A., Batalev V. Magnetotelluric data analysis from the continental collision zone in the Pamir and Tien Shan, Central Asia // Geophys. Res. Abstracts, 2011, v. 13, EGU2011-8624.

Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tympel J., Matiukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Yu. Resistivity structure underneath the Pamir and Southern Tian Shan // Geophys. J. Int., 2014, doi: 10.1093/gji/ggu146.