

ВЗАИМОСВЯЗЬ АНОМАЛИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ, СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И РЕЖИМА СЕЙСМИЧНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

© 2015 г. Е. А. Баталева, В. Ю. Баталев, А. К. Рыбин

Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке
720049, г. Бишкек-49, Киргизская Республика
E-mail: bataleva@gdirc.ru

Поступила в редакцию 27.02.2015 г.

Принята к печати 21.04.2015 г.

Исследована глубинная структура литосферы Центрального Тянь-Шаня. Сравнительный анализ сейсмотомографических построений и результатов интерпретации электромагнитных зондирований вдоль профилей “NARYN” (76° в.д.) и “MANAS” позволил установить следующие закономерности: а) зонам повышенной электропроводности соответствуют области пониженных сейсмических скоростей; б) зонам пониженной электропроводности отвечают области повышенных сейсмических скоростей; в) для массивов эклогитовых пород, выделенных в результате комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, характерны повышенные сейсмические скорости. Подавляющее большинство гипоцентров сейсмических событий с энергетическим классом $K > 9$ ограничено глубиной 25 км и расположено внутри или вблизи границ высокоомных блоков геоэлектрической модели, где удельное электросопротивление составляет 10^3 – 10^4 Ом·м. Количество трещин и водных флюидов в этих высокоомных блоках, по-видимому, недостаточно для образования сквозной электропроводящей сети. Соответственно, они являются жесткими и способны аккумулировать упругую энергию для реализации сейсмического процесса.

Ключевые слова: земная кора, кажущееся электрическое сопротивление, геодинамика, сейсмология, сейсмотомография, сейсмическая активность.

ВВЕДЕНИЕ

Глубинные геофизические методы традиционно используются для построения геолого-геофизических моделей таких сложноустроенных регионов, как внутриконтинентальные орогены, одним из ключевых объектов которых является Тянь-Шань. Изучение глубинного строения литосферы Центрального Тянь-Шаня осуществляется Научной станцией РАН в г. Бишкек на протяжении последних 35 лет и остается одним из наиболее приоритетных направлений (Баталев и др., 1989, 1993; Трапезников и др., 1997; Рыбин и др., 2001, 2008; Брагин и др., 2001; Баталева и др., 2006; и др.). Комплекс геолого-геофизических исследований, выполняемый в рамках международного сотрудничества, включал в себя методы магнитотеллурического (МТ) и магнитовариационного (МВ) зондирования – профиль “NARYN” (76° в.д.); метод обменных волн землетрясений (МОВЗ) и метод общей глубинной точки (МОВ ОГТ) – профиль “MANAS”; сейсмологии, а также результаты петрофизических измерений, полученные в лабораторных условиях (Рыбин и др., 2008; Макаров и др., 2010; Бердичевский и др., 2010; Рыбин, 2011; Бата-

лев и др., 2011; Bielinski et al., 2003; Park et al., 2003; Buslov et al., 2007; Li et al., 2009; Bagdassarov et al., 2011; и др.).

Основная роль в изучении глубинного строения Тянь-Шаня принадлежит электромагнитным зондированиям (МТЗ-МВЗ), что позволяет получить распределение геоэлектрических неоднородностей до глубин нижней коры–верхней мантии (Трапезников и др., 1997), достаточно надежно определить поведение глубинных разломных зон в верхней части земной коры (Баталев, 2002; Баталева и др., 2006; Баталев и др., 2013). Обобщенные результаты магнитотеллурических и геофизических исследований по территории Центрального Тянь-Шаня были опубликованы в работах (Трапезников и др., 1997; Киссин, Рузайкин, 1997; Брагин и др., 2001; Рыбин и др., 2001; Рыбин, 2011; и др.).

Неоднородности распределения физических свойств в земной коре и верхней мантии находят отражение в аномальном поведении геофизических полей. Неизменное внимание геофизиков привлекает соотношение изменения электропроводности и скоростных характеристик геологической среды. Сопоставление, выполненное в работе (Киссин, Рузайкин, 1997), показало достаточно хорошую кор-

реляцию областей с пониженными сейсмическими скоростями и повышенным поглощением сейсмических волн с зонами повышенной электропроводности, что свидетельствует в пользу флюидной природы наблюдаемых аномалий. Вместе с тем авторы работы приходят к выводу о том, что очаги сейсмических событий концентрируются на участках с контрастными электрическими и сейсмическими характеристиками земной коры (Киссин, Рузайкин, 1997).

Результаты дальнейших исследований взаимосвязи распределения сейсмических событий и электрических свойств среды для всей территории Центрального Тянь-Шаня приведены в работе (Зубович и др., 2001). Из общего числа зарегистрированных с 1967 г. землетрясений (7621) в пределах корового проводящего слоя были зафиксированы гипоцентры лишь 151 сейсмического события, остальные расположены выше корового проводящего слоя. Со стремительным развитием компьютерных технологий и аппаратных средств для измерения геофизических полей появилась возможность создания более точных и достоверных геофизических моделей. В целях получения более полных представлений о глубинном строении, структуре и составе литосферы Центрального Тянь-Шаня, а также проведения комплексного анализа современных геологических и геофизических моделей Научной станцией РАН были выполнены разноплановые и разномасштабные геолого-геофизические исследования (Макаров и др., 2010).

В настоящей работе проведено сопоставление геоэлектрической модели (Bielinski et al., 2003), трех наиболее современных сейсмотомографических построений (Сабитова и др., 2009; Li et al., 2009; Koulakov, 2011) и пространственного положения гипоцентров очагов землетрясений с $K > 9$ вдоль трансекта "NARYN" (по данным каталогов KNET (НС РАН) и Института сейсмологии НАН КР).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВДОЛЬ МЕРИДИАНА 76° в.д.

Основной целью глубинных геофизических исследований является идентификация в литосфере исследуемого региона блоков и слоев земной коры с аномальными физическими параметрами (т.е. определение ее расслоенности и блоково-разломной структуры), выявление зон трещиноватости или разуплотнения горных пород, которые могут быть связаны с флюидонасыщенными областями.

В середине 80-х гг. прошлого столетия были выполнены магнитотеллурические зондирования по геотранверсу, секущему Центральный Тянь-Шань вкрест простирания основных структур (по 76° в.д.), протяженность которого составила 450 км (рис. 1). Основной целью этих работ являлось исследование зоны сочленения Тарима и Тянь-Шаня, глубинного строения внутригорных и межгорных

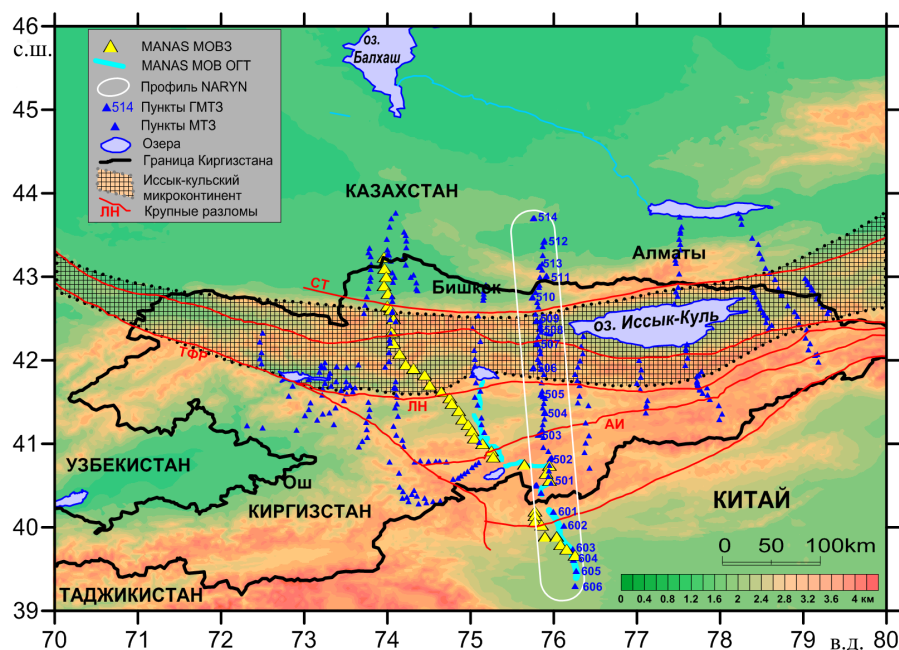


Рис. 1. Схема геофизической изученности Центрального Тянь-Шаня.

Глубинные разломы: СТ – Северо-Тянь-Шаньский, ЛН – Линия Николаева, ТФР – Таласо-Ферганский, АИ – Атбаш-Иныльчекский.

Fig. 1. Map of locations of the magnetotelluric profiles across Tien Shan.

Deep fault: CT – North Tien Shan, LN – Nikolaev Line, TFR – Talaso-Fergana, AI – Atbashi-Inyl'chek.

впадин, выяснение природы коровой проводимости, а также характера взаимосвязи распределения сейсмичности и коровых проводящих слоев.

Дальнейшее развитие МТ-исследования получили в ходе реализации (совместно с американскими коллегами) проекта “Теодинамика Тянь-Шаня”. В процессе численного моделирования, выполненного в Калифорнийском университете (г. Риверсайд), была достигнута убедительная сходимость экспериментальных и расчетных кривых МТЗ ($RMS = 1.42$). Входной ансамбль данных включал в себя результаты МТЗ, полученных в 1986–2002 гг. При расчете 2D-модели с помощью системы GEOTOOLS использовалась бимодальная инверсия, ансамбль инвертируемых данных включал в себя кроме ТЕ- и ТМ-моды компоненты матрицы Визе–Паркинсона. Критерием выбора наименее искаженный компонент данных, реализуемых через введение весовых коэффициентов, являлась устойчивость к действию эффекта статического смещения, который не может быть промоделирован при расчете 2D-инверсии. Наименьшие весовые коэффициенты (подбирившиеся опытным путем) применялись к кривым кажущегося сопротивления – 5% для ТМ-моды и 15% для ТН-моды. Для фаз импеданса и компонент матрицы Визе–Паркинсона применялись наибольшие весовые коэффициенты – 3 и 6° (для ТМ-моды и ТН-моды) и 10% для типпера соответственно. Итоговая модель получена с помощью параллельной инверсии, опубликованной в работе (Bielinski et al., 2003). Достоинством этой модели является ее хорошее соответствие современным геологическим представлениям, а также согласованность с сейсмическими данными (ГСЗ, МОВ-ОГТ, МОВЗ, сейсмотомография), распределением глубинных температур, поведением эманаций мантийного гелия и петрофизическими исследованиями (Баталев и др., 2011; Bagdassarov et al., 2011).

Следующий этап МТ-исследований вдоль геотраверса (76° в.д.) был связан с появлением аппаратуры нового поколения “Феникс” MTU-5, повышением точности полевых наблюдений и развитием методики инверсии МТ-данных (Бердичевский и др., 2010; Рыбин, 2011). На этом этапе были выполнены детализационные работы в наиболее интересных с точки зрения тектоники областях, таких как разломная зона Линии Николаева и зона сочленения Тарима и Тянь-Шаня (Рыбин и др., 2009). Особое внимание уделялось развитию методики обработки и анализа магнитотеллурических данных с использованием помехоподавляющей технологии mRRMC, подробно представленной в работе (Varentsov, 2007).

С помощью новых методик обработки магнитотеллурических данных удалось достичь существенного повышения точности определения дополнительных компонент импеданса и уточнения деталей строения в верхней части разреза. Результиру-

ющая модель с использованием метода последовательных частичных инверсий, где на первом этапе для локализации глубинных аномалий электропроводности используются магнитовариационные отклики, а затем привлекаются данные магнитотеллурического зондирования, служащие для уточнения структуры вмещающей среды и деталей строения верхней части разреза, представлена в работах (Бердичевский и др., 2010; Рыбин, 2011).

Несмотря на отличия, которые обусловлены разными целями и подходами к инверсии МТ-данных, в обеих этих моделях выделены такие важные геоэлектрические структуры Центрального Тянь-Шаня, как зона сочленения Казахской платформы и Тянь-Шаня, Северо-Тяньшаньской разлом, разломная зона Линии Николаева, Атбаши-Иньчжэньский разлом, зона сочленения Таримского бассейна и Тянь-Шаня. Уверенно выделен коровой проводящий слой в интервале глубин 20–55 км с проводимостью, меняющейся по латерали, который прослеживается практически вдоль всего геотраверса. Для модели (Бердичевский и др., 2010; Рыбин, 2011) объем инвертируемых данных был существенно увеличен за счет добавления большого количества широкодиапазонных детализационных данных, полученных со станциями “Феникс” MTU-5D.

Данные глубинных зондирований со станциями LIMS составляют основу в инвертируемых ансамблях данных обеих моделей. Соответственно, в модели (Рыбин, 2011) с высокой детальностью выполнено расчленение верхней части разреза и учтено влияние рельефа. В то же время в геоэлектрической модели (Bielinski et al., 2003), которая будет использоваться далее, очень контрастно выделены структуры в нижней коре и верхней мантии. Наиболее информативным нам представляется совместный анализ геоэлектрических и сейсмотомографических моделей, а основная направленность сейсмотомографических построений состоит в изучении нижней коры и мантии и, в меньшей степени, верхней части коры и осадочных бассейнов.

Сейсмотомографические исследования Центрального Тянь-Шаня и сопредельных территорий выполнялись многими авторами с использованием разных баз данных и с различной детальностью, поэтому в настоящей работе для сопоставления с геоэлектрической моделью выбраны наиболее современные и детальные модели исследуемого региона, представленные в работах (Сабитова и др., 2009; Li et al., 2009; Koulakov, 2011).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И АНАЛИЗ СОПОСТАВЛЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

На рис. 2а геоэлектрическая модель совмещена с частью сейсмотомографической модели вдоль профиля “NARYN”, представленной в работе (Li

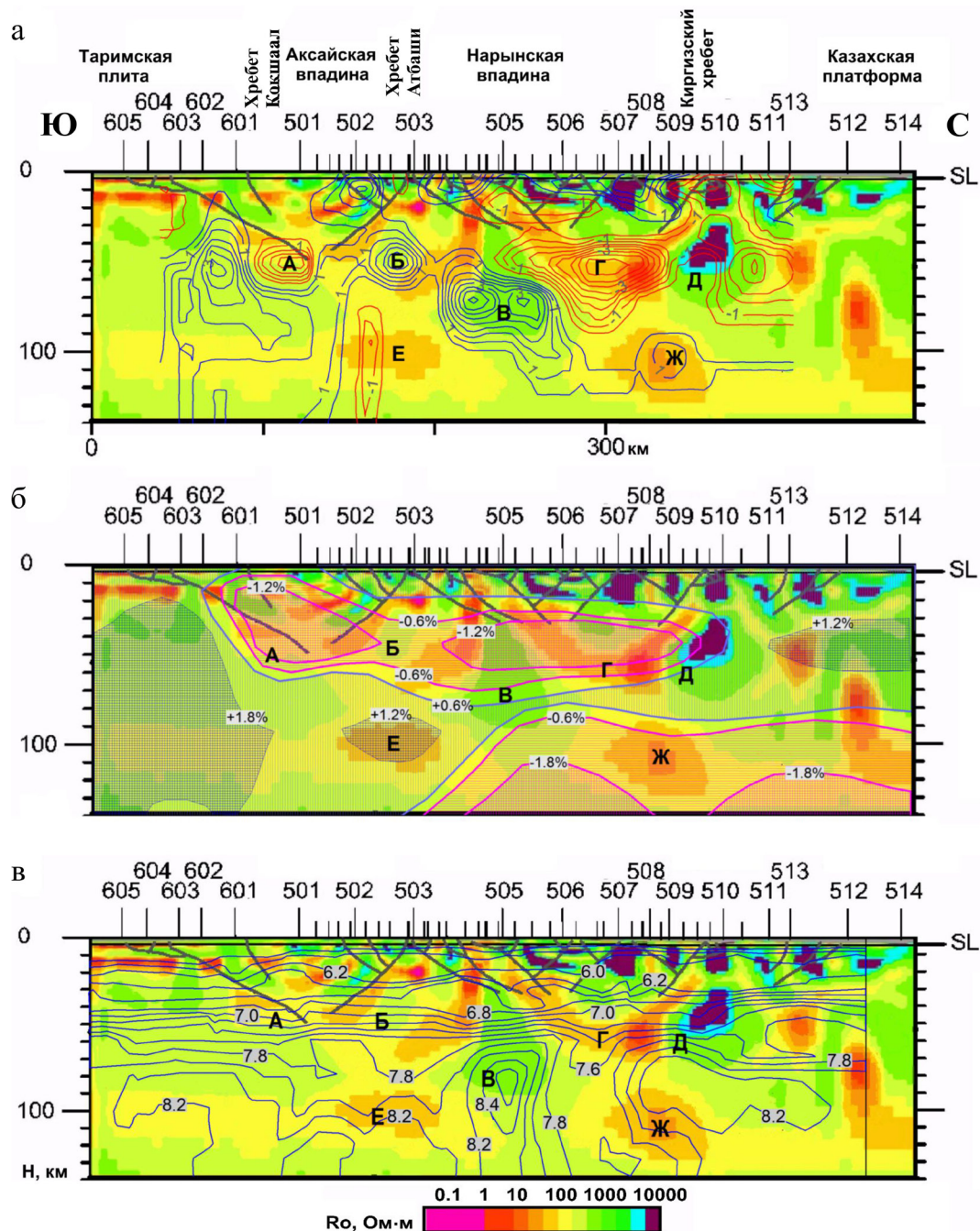


Рис. 2. Сопоставление результатов геоэлектрики (Bielinski et al., 2003) и сейсмологии по данным разных авторов.

а – Li et al., 2009; б – Koullakov, 2011; в – Сабитова и др., 2009. Числа над разрезами указывают номера пунктов ГМТЗ. Описание участков (зон), обозначенных буквами, приводится в тексте.

Fig. 2. Correlation anomalous objects of geoelectric model (Bielinski et al., 2003) and anomalies of the velocity of longitudinal seismic waves by the different authors data.

а – Li et al., 2009; б – Koullakov, 2011; в – Сабитова и др., 2009. The characters above cross section shows numbers DMTS. Description sections (zones) designated by letters are shown in text.

et al., 2009). Центральная и северная части трансекта “MANAS” (25 сейсмических станций) расположены западнее меридиана 76° в.д., а южная часть (13 сейсмических станций) располагается вдоль

МТ-профиля (см. рис. 1). Для построения сейсмотомографической модели по меридиану 76° использовались данные сетей сейсмических станций KNET, сети Института сейсмологии Киргизской

Республики, сети GHENGIS и трансекта “MANAS” (Li et al., 2009). При сопоставлении (в пределах разрешающей способности методов) разреза электропроводностей с разрезом аномалий скоростей продольных сейсмических волн наблюдается хорошее соответствие крупных аномальных объектов, выделяемых обоими методами. Для удобства описания на рис. 2а они обозначены буквами. Наиболее интересны следующие объекты. А – зона пониженных сейсмических скоростей и пониженных электропроводностей, расположенная в основном под поверхностью поддвига Тарима под Тянь-Шань, на рис. 2а показанной в редакции (Thompson et al., 2002). Представляется оправданным объяснение этой аномалии присутствием флюидной компоненты в массивах субдуцированных в карбоне (C_{1-2}) пород. Б – зона повышенных скоростей и повышенной электропроводности; В – зона интенсивной положительной аномалии сейсмических скоростей и столь же интенсивной положительной аномалии электропроводности.

В геоэлектрическом разрезе под Нарынской впадиной обращает на себя внимание высокоомное тело, расположенное в диапазоне глубин $\approx 20\text{--}90$ км, и характеризующееся электропроводностью $3000\text{--}6000$ Ом·м. Очевидно, что это тело не может быть представлено одним типом пород, так как внутри указанного диапазона глубин температура возрастает от ≈ 400 до $\approx 900^\circ\text{C}$ и, соответственно, электропроводность (одного типа пород) при этом должно уменьшиться в несколько раз.

Разделение геоэлектрической зоны В на две части по сейсмотомографическим данным является косвенным подтверждением этого предположения. Нижняя часть геоэлектрической зоны В соответствует положительной аномалии сейсмических скоростей. Зона Г, которая характеризуется пониженными сейсмическими скоростями и значениями электропроводности, располагается преимущественно под основанием и с боков Иссык-Кульского микроконтинента (см. рис. 1) (Buslov et al., 2003).

Наиболее интенсивные аномалии обоих геофизических полей (зона Г) наблюдаются под основанием Иссык-Кульского микроконтинента. Этот факт позволяет сделать предположение о перемещении мантийных флюидов по зоне ордовикской субдукции (Буртман, 2012), их концентрации под основанием Иссык-Кульского микроконтинента и о его низкой проницаемости. Зона Д, являющаяся в геоэлектрическом разрезе изолятором, не связана с возрастанием сейсмических скоростей, но отражается в существенном уменьшении отрицательной аномалии сейсмических скоростей по отношению к соседним массивам. Обсуждение глубинной части разреза – зон Е и Ж – в значительной степени носит предположительный характер, так как интенсивность аномалий сейсмических скоростей невелика и составляет около 1%.

В отношении зоны Ж, являющейся в геоэлектрическом разрезе проводящим объектом, можно сказать, что распределение электропроводности и температуры от зоны Ж по направлению к зоне Д, соответствует диаграмме Арпениуса для эклогитов хребта Ат-Баши (Bagdassarov et al., 2011), таким образом, есть основания предполагать, что зона Ж – это массив эклогитов или эклогитоподобных пород. Наблюдаемая положительная аномалия сейсмических скоростей может быть объяснена повышенной плотностью эклогитов по отношению к соседним массивам пород. В зоне Е конфигурация и знак аномалии сейсмических скоростей не соответствуют аномалии электропроводности и сделанным ранее выводам об эклогитовом составе этого объекта (Баталев, 2011), подтвержденным лабораторными измерениями электропроводности образцов эклогитов из этого района, что может быть связано с недостаточной разрешающей способностью сейсмотомографии.

На рис. 2б представлена геоэлектрическая модель, совмещенная с соответствующей ей частью сейсмотомографической модели (Koulakov, 2011). “Томографическая инверсия осуществлялась на базе нелинейного алгоритма пассивной сейсмической томографии LOTOS, теоретические основы и технические детали которого описаны на интернет-сайте <http://www.ivan-art.com/science/LOTOS/>. Программа томографии LOTOS (Local Tomography Software) предназначена для одновременной инверсии Р и S скоростных структур и координат источников. На исходном этапе расчетов производится одновременная оптимизация наилучшей 1D-скоростной модели и предварительная локализации источников. Распределение, обеспечивающее минимальное значение средней невязки, выбиралось в качестве референтной модели для дальнейшего томографического моделирования” (Koulakov, 2011). При сопоставлении использовался профиль скоростей сейсмических волн, ближайший к меридиану 76° в.д. В отличие от модели (Koulakov, 2011) для сейсмотомографических построений в работе (Li et al., 2009) не использовались данные локальных сейсмических сетей (таких как сеть KNET, сети Института сейсмологии Киргизской Республики, сети GHENGIS и трансекта “MANAS”). Для инверсии привлекались данные только мирового каталога ISC за 1964–2004 гг. Прежде всего, обращает на себя внимание отрицательная аномалия (около -1.2%), расположенная в земной коре Тянь-Шаня, протяженностью от Тарима до Киргизского хребта. Ей соответствует зона повышенной коровой электропроводности, представленная не единым проводящим слоем, как это считалось раньше, а последовательностью (зоны А, Г и несколько более мелких (см. рис. 2б)) наклонно залегающих электропроводящих объектов.

Многие из них имеют форму листрических разломов и разделяют высокоомные блоки земной ко-

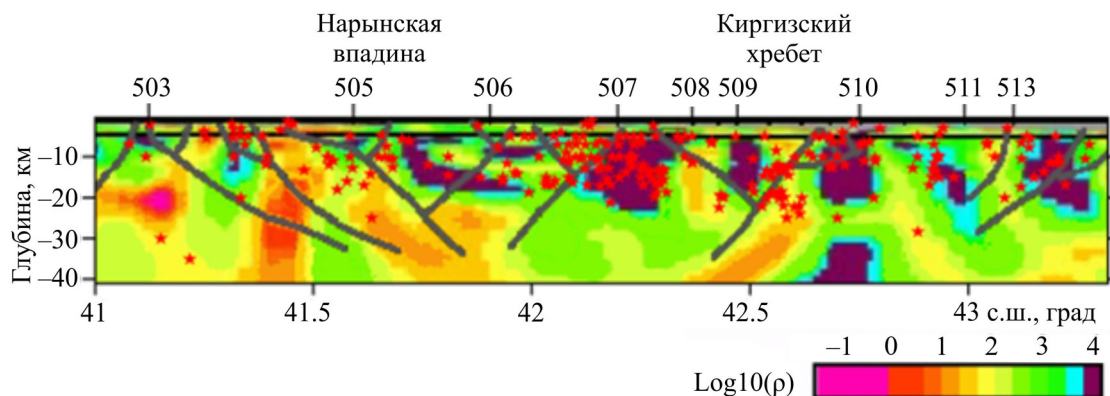


Рис. 3. Распределение гипоцентров землетрясений ($K > 9$) в полосе $\pm 1^\circ$ вдоль геофизического профиля “NARYN” через зону Иссык-Кульского микроконтинента.

Звездочки – положение гипоцентров, числа над разрезом – номера пунктов ГМТЗ.

Fig. 3. Distribution of hypocenters of earthquakes ($K > 9$) in the band $\pm 1^\circ$ along the “NARYN” geophysical profile across the area of the Issyk-Kul microcontinent.

Position of hypocenters are shown by asterisks, characters above the cross section shown numbers DMTS.

ры. Уменьшение скоростей сейсмических волн V_p в земной коре Тянь-Шаня на рассматриваемом участке подтверждает флюидную природу коровой электропроводности. Положительные аномалии скоростей сейсмических волн V_p приурочены к фундаменту Таримского блока и Казахской платформы, которые с точки зрения геоэлектрики характеризуются как высокоомные (600–1000 Ом·м) и, соответственно, малодислоцированные и плотные. Эклогитовому массиву, который в геоэлектрическом разрезе расположен под пунктами 502–503 на глубинах порядка 85–105 км (зона Е на рис. 2б), соответствует положительная аномалия скоростей сейсмических волн ($V_p + 1.2\%$). Повышенные значения скоростей V_p в рассматриваемом массиве относительно вмещающих пород свидетельствуют о его высокой плотности, подтверждая тем самым данные об эклогитовом составе массива.

Зона Ж на рис. 2б, предположительно имеющая эклогитовый состав, не выделяется положительной аномалией сейсмических скоростей, как зона Е, где эклогитовый состав подтвержден лабораторными измерениями электропроводности, а лишь характеризуется значительным уменьшением интенсивности отрицательной аномалии скоростей V_p . Сопоставление объектов геоэлектрического и скоростного разрезов по продольным сейсмическим волнам (Сабитова и др., 2009) показано на рис. 2в. Для расчета трехмерной скоростной модели, использовалась система наблюдений, которая включала в себя свыше 300 сейсмических станций (как аналоговых, так и цифровых сетей KNET, GHENGIS, IRIS и GEOSCOPE), действующих на территориях Киргизской Республики и сопредельных районов в течение последних 40 лет. Расчеты

скоростной модели осуществлялись с помощью пакета программ С. Рекера (Roecker et al., 1993) и были выполнены на базе массива первичных данных, содержащего времена первых вступлений Р- и S-волн от 1977 региональных ($\Delta < 1000$ км), 3579 телесейсмических землетрясений и 27 ядерных взрывов ($\Delta < 10\,000$ км). Трехмерная скоростная модель литосферы Тянь-Шаня глубин ($H = 0\text{--}225$ км) в общих чертах описана в работе (Адамова и др., 2006). В работе (Сабитова и др., 2009) представлены как широтные, так и меридиональные скоростные разрезы, в том числе и для меридиана 76° в.д. В данном случае нами рассматриваются не аномалии сейсмических скоростей, а сами скорости, наиболее интенсивные изменения которых наблюдаются в зоне В, что подтверждает надежность выделения этой аномалии в работе (Li et al., 2009) и геоэлектрической модели. При анализе соотношения аномальных структур в геофизических моделях с распределением сейсмичности вдоль геотраверса, было рассмотрено положение гипоцентров землетрясений в полосе $\pm 1^\circ$ вдоль меридиана 76° в.д. через Тянь-Шань (рис. 3). Обращает на себя внимание тот факт, что подавляющее большинство гипоцентров землетрясений с $K > 9$ расположено внутри и вдоль границ высокоомных блоков модели ($\rho \approx 10^3\text{--}10^4$ Ом·м) (см. рис. 3).

В верхней–средней частях коры блоки модели с высоким электросопротивлением, скорее всего, не содержат водных флюидов в количестве, достаточном для образования сквозной электропроводящей сети. Они являются “сухими”, т.е. жесткими, способными к накоплению упругой энергии, достаточной для реализации сейсмического процесса (Родкин, 1993). Это наблюдение предоставляет допол-

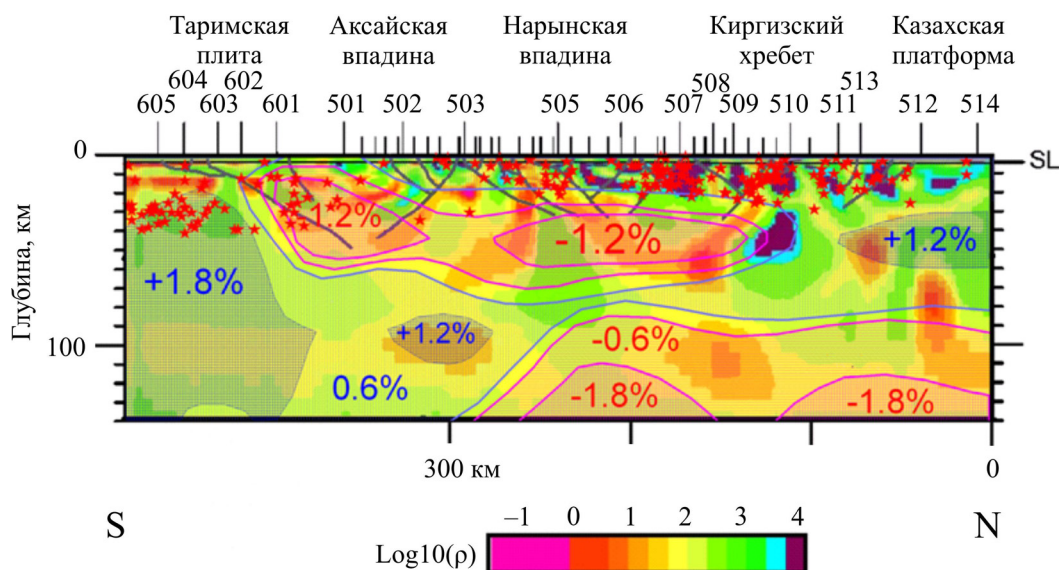


Рис. 4. Распределение коровой сейсмичности с $K > 10.5$ (показаны звездочками) в сопоставлении с аномалиями (%) скоростей продольных сейсмических волн (Koulakov, 2011).

Геоэлектрический разрез по (Bielinski et al., 2003).

Fig. 4. Distribution of crustal seismicity $K > 10.5$ (indicated by asterisks) compared with anomalies (%) velocities of longitudinal seismic waves (Koulakov, 2011).

Geoelectric section by (Bielinski et al., 2003).

нительное подтверждение флюидной природы коровой проводимости.

На рис. 4 показана приуроченность гипоцентров землетрясений к участкам положительных аномалий сейсмических скоростей V_p сейсмотомографической модели.

По глубине возникновения данные сейсмические события являются коровыми, и, как отмечалось выше, гипоцентры землетрясений в фундаменте Таримского блока залегают на глубинах до 40 км, в то время как подавляющее большинство гипоцентров землетрясений Тянь-Шаня локализуется на глубинах до 20 км. Вместе с тем практически все гипоцентры землетрясений расположены в пределах положительной аномалии сейсмических скоростей V_p и лишь некоторые сейсмические события приурочены к отрицательной аномалии, что можно наблюдать только для зоны непосредственного коллизионного воздействия и поддвигания Тарима под Тянь-Шань (пункты МТЗ 602–501). Таким образом, коровый слой с пониженными сейсмическими скоростями, соответствующий зоне повышенной коровой электропроводности, практически не содержит в себе гипоцентров землетрясений, что свидетельствует о его флюидонасыщенности и пластичности, т.е. неспособности накапливать упругую энергию, достаточную для возникновения землетрясений. На основе выборки, которая содержала в себе 149 событий с $K > 10.5$ за период с 1987 по 2012 г. мы можем сделать вывод о приуроченно-

сти сейсмичности к высокоомным блокам модели ($\rho \approx 10^3\text{--}10^4$ Ом·м) и их границам (см. рис. 4). Обращает на себя внимание практически полное отсутствие сейсмичности в области Аксайской впадины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В геоэлектрической структуре земной коры Центрального Тянь-Шаня выделена система разнонаправленных проводящих тел, которые отождествляются с фрагментами глубинных разломов, сутурными зонами, а также с границами Иссык-Кульского микроконтинента. Структуры пониженного сопротивления пространственно приурочены к зонам основных разрывных нарушений – Линии Николаева, Южно-Кочкорского, Атбаши-Иныльчекского и Южно-Тяньшанского разломов. В геоэлектрической структуре зоны сочленения Центрального Тянь-Шаня и Таримской плиты выявлена низкоомная зона, которая начинается южнее Аксайской впадины, полого погружается на север до глубин порядка 80 км и соответствует “деструктивной” зоне (Макаров и др., 2010). Предполагается, что положение этой зоны соответствует субдукционному сценарию и отражает процесс поддвигания литосферы Тарима под Тянь-Шань.

На основании комплексного анализа распределения геоэлектрических и скоростных неоднородностей литосферы Центрального Тянь-Шаня вдоль геотраверса “NARYN” (76° в.д.) установлено сле-

дующее: а) зонам повышенной электропроводности соответствуют области пониженных сейсмических скоростей; б) зонам с пониженной электропроводностью – области повышенных сейсмических скоростей; в) для массивов эклогитовых пород, выделенных в результате комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, характерны повышенные сейсмические скорости.

Наибольшая плотность гипоцентров сейсмических событий с $K > 9$ наблюдается на границах высокоомных блоков и внутри них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адамова А.А., Сабитова Т.М., Миркин Е.Л., Багманова Н.Х. (2006) Модели для блочной аппроксимации распределения скорости с использованием программы SPHURIT 90 (алгоритм С. Рекера). *Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью* (Под ред. А.Б. Бакирова). Бишкек: Илим, 9-18.
- Баталев В.Ю. (2002) Глубинное строение и геодинамика западной части Киргизского Тянь-Шаня по данным магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Бишкек, 139 с.
- Баталев В.Ю. (2011) Петрологическая интерпретация магнитотеллурических данных глубинной зоны сочленения Тарима и Тянь-Шаня. *Докл. АН*. **438**(2), 212-216.
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Егорова В.В., Матюков В.Е., Рыбин А.К. (2011) Геоэлектрическая структура литосферы Центрального и Южного Тянь-Шаня в сопоставлении с петрологическим анализом и лабораторными исследованиями нижнекоровых и верхнемантийных ксенолитов. *Геология и геофизика*. (12), 2022-2031.
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К. (2013) Глубинное строение западной части зоны Таласо-Ферганского разлома по результатам магнитотеллурических зондирований. *Литосфера*. (4), 136-145.
- Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Голланд М.Л., Голубцова Н.С., Кузнецов В.А. (1989) Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований в Чуйской межгорной впадине. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. (9), 42-45.
- Баталев В.Ю., Волыхин А.М., Рыбин А.К., Трапезников Ю.А., Финякин В.В. (1993) Строение земной коры восточной части Киргизского Тянь-Шаня по данным МТЗ и ГМТЗ. *Проявление геодинамических процессов в геофизических полях*. М.: Наука, 96-113.
- Баталева Е.А., Буслов М.М., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Сафронов И.В. (2006) Аномалии электропроводности зоны Таласо-Ферганского разлома и геодинамическая интерпретация глубинной структуры юго-западного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. (9), 1036-1042.
- Бердичевский М.Н., Соколова Е.Ю., Варенцов И.М., Рыбин А.К., Баглаенко Н.В., Баталев В.Ю., Голубцова Н.С., Матюков В.Е., Пушкарев П.Ю. (2010) Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: анализ магнитотеллурических и магнитовариационных откликов вдоль геотраверса НАРЫН. *Физика Земли*. (8), 36-53.
- Брагин В.Д., Баталев В.Ю., Zubovich A.B., Лобанченко А.Н., Рыбин А.К., Трапезников Ю.А., Щелочков Г.Г. (2001) О качественных связях современных движений с геоэлектрическим разрезом земной коры Центрального Тянь-Шаня и распределением сейсмичности. *Геология и геофизика*. **42**(10), 1610-1621.
- Буртман В.С. (2012) Тянь-Шань и Высокая Азия: геодинамика в кайнозое. М.: ГЕОС, 188 с.
- Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Мосиенко О.И., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. (2001) Поле деформаций, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. **42**(10), 1634-1640.
- Киссин И.Г., Рузайкин А.И. (1997) Соотношение между сейсмоактивными и электропроводящими зонами в земной коре Киргизского Тянь-Шаня. *Физика Земли*. (1), 21-29.
- 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. (2010) Поддвиг Тарима под Тянь-Шань и глубинная структура зоны их сочленения: основные результаты сейсмических исследований по профилю MANAS (Кашгар–Сонкель). *Геотектоника*. (2), 23-42.
- Родкин М.В. (1993) Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. М.: Нац. геофиз. ком., 194 с.
- Рыбин А.К. (2011) Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических исследований. М.: Науч. мир, 232 с.
- Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е. А., Матюков В.Ю. (2009) Магнитотеллурические свидетельства глубинных геодинамических условий в зоне сочленения Южного Тянь-Шаня и Тарима. *Записки Горного института*. **183**, 272-276.
- Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Ильичев П.В., Щелочков Г.Г. (2001) Магнитотеллурические и магнитовариационные исследования Киргизского Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. **42**(10), 1566-1573.
- Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. (2008) Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. **49**(5), 445-460.
- Сабитова Т.М., Багманова Н.Х., Миркин Е.Л. (2009) Скоростные неоднородности литосферы Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. *Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: мат-лы Четвертого Междунар. симпоз.* Москва–Бишкек: Кантская типография, 406-415.
- Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Волыхин А.М., Голубцова Н.С., Рыбин А.К. (1997) Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня. *Физика Земли*. (1), 3-20.
- Bagdassarov N., Batalev V., Egorova V. (2011) State of lithosphere beneath Tien Shan from petrology and electrical conductivity of xenoliths. *J. Geophys. Res.* **116**(B01202). doi:10.1029/2009JB007125. cСТР

- Bielinski R.A., Park S.K., Rybin A., Batalev V., Jun S., Sears C. (2003) Lithospheric heterogeneity in the Kyrgyz Tien Shan imaged by magnetotelluric studies. *Geophys. Res. Lett.* **30**(15). 1806. doi:10.1029/2003GL017455.
- Buslov M.M., De Grave J., Bataleva E.A., Batalev Yu.V. (2007) Cenozoic tectonic and geodynamic evolution of the Kyrgyz Tien Shan Mountains: A review of geological, thermochronological and geophysical data. *J. Asian Earth Sci.* **29**(2-3), 205-214.
- Buslov M.M., Klerkx J., Abdrakhmanov K., Delvaux D., Batalev V.Yu., Kuchai O.A., Dehandschutter B., Muraliev A. (2003) Recent strike-slip deformation of the northern Tien Shan. *Intraplate strike-slip deformation belts Geol. Soc. London, Spec. Publ.* **210**, 53-64.
- Koulakov I.Y. (2011) High-frequency P and S velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide travel time data. *J. Geophys. Res.* **116**(B04301), 1-22.
- Li Z.W., Roecker S., Li Z.H., Wei B., Wang H., Schelochkov G., Bragin V. (2009) Tomographic image of the crust and upper mantle beneath the western Tien Shan from the MANAS broadband deployment: Possible evidence for lithospheric delamination. *Tectonophysics*. **477**, 49-57.
- Park S.K., Thompson S.C., Rybin A., Batalev V., Bielinski R. (2003) Structural constraints in neotectonic studies of thrust faults from the magnetotelluric method, Kochkor Basin, Kyrgyz Republic. *Tectonics*. **22**(2), 1013, doi:10.1029/2001TC001318.
- Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P. et al. (1993) Three-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien Shan. *J. Geophys. Res.* **98**(B9), 15779-15795.
- Thompson S.C., Weldon R.J., Rubin C.M., Abdrakhmatov K., Molnar P., Berger G.W. (2002) Late Quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia. *J. Geophys. Res.* **107**(B2203), 1-32.
- Varentsov I.V. (2007) Arrays of simultaneous electromagnetic soundings: design, data processing and analysis. *Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40)*. Elsevier, 263-277.

Рецензент А.Г. Дьяконова

Interrelation of conductivity, seismic velocities and the seismicity for Central Tien Shan lithosphere

E. A. Bataleva, V. Y. Batalev, A. K. Rybin,

Research Station of the Russian Academy Sciences in Bishkek, Kyrgyz Republic

The work is devoted to investigation of the deep structure of the Central Tien Shan lithosphere. Comparative analysis of seismic tomography models and results of interpretation of magnetotelluric and magnetovariational soundings along "NARYN" (76°E.) profile, allowed to establish a correlation of velocity features and electrical properties of the Earth's crust: a) corresponding of zones high conductivity to zones of low seismic velocities; b) low conductivity zones are the areas of high seismic velocities; c) high seismic velocities characterize massif of eclogites detected as a result of complex interpretation of geological and geophysical data. The vast majority of hypocenters seismic events with energy class $K > 9$ is limited to a depth of 25 km and is located within or near the boundaries of high-resistivity blocks geoelectric model, where the electrical resistivity is 10^3 – $10^4 \Omega \cdot m$. Quantity of cracks and aqueous fluids in these high-resistance blocks seems not sufficient for the formation of through conductive network. Consequently, they are rigid and able to accumulate the elastic energy for realization of the seismic process.

Key words: *Earth's crust, apparent electrical resistance, geodynamics, seismology, seismic tomography, seismic activity.*