

АНОМАЛИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЗОНЫ ТАЛАСО-ФЕРГАНСКОГО РАЗЛОМА И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЛУБИННОЙ СТРУКТУРЫ ЮГО-ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Е.А. Баталева, М.М. Буслов*, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, И.В. Сафронов

Научная станция РАН, 720049, Бишкек, Киргизия

* Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

В результате проведенных исследований в зоне Таласо-Ферганского разлома (ТФР) методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) в геоэлектрических моделях по пяти профилям была выявлена аномалия электропроводности (комбинация коровых проводников) мощностью 10—15 км и глубиной залегания до 45 км. Установлено, что коровый проводник поднимается к поверхностным слоям в районе ТФР и резко выполаживается в сторону Юго-Западного и Северо-Восточного Тянь-Шаня. В плане аномалия электропроводности, приуроченная к зоне ТФР, по своим характеристикам подразделяется на три звена — Таласское, Центральное и Южное. Зона ТФР, установленная по геологическим данным как крутозалегая структура сдвига, выражена в электромагнитном поле как субвертикальная проводящая структура лишь в Центральном звене. В Таласском звене она имеет форму листрического разлома.

Интерпретация результатов МТЗ в корреляции с геологическими данными показывает, что в современной геодинамической обстановке Юго-Западного Тянь-Шаня фиксируется дугообразная в плане структура, имеющая листрическую глубинную форму с погружением до 40—45 км к центру Ферганского блока. Такая форма активной зоны хорошо согласуется с данными (структурными, палеомагнитными и GPS) о вращательном движении Ферганского блока, происходящем под воздействием давления Памира.

Магнитотеллурическое зондирование, аномалия электропроводности, коровые проводники, современное поле деформаций, Таласо-Ферганский разлом, Ферганский блок, Тянь-Шань, Памир.

CRUSTAL CONDUCTOR ASSOCIATED WITH THE TALAS-FERGANA FAULT AND DEEP STRUCTURE OF THE SOUTHWESTERN TIEN SHAN: GEODYNAMIC IMPLICATIONS

E.A. Bataleva, M.M. Buslov, A.K. Rybin, V.Yu. Batalev, and I.V. Safronov

MTS data from five profiles across the zone of the Talas-Fergana Fault (TFF), interpreted in geoelectrical models, reveal a 10–15 km thick crustal conductor (consisting of several conductors) traceable to a depth of 45 km. The conductor rises to the upper crust along TFF and flattens out toward the Southwestern and Northeastern Tien Shan. The anomaly attributed to the TFF zone is divided into the Talas, Central, and Southern segments in the map view. TFF, interpreted as a high-angle strike-slip fault from geological data, is recorded in the electromagnetic field as a nearly vertical conductor only in its Central segment and shows a listric geometry in the Talas segment.

Interpretation of the MTS results correlated to geological data suggests that the modern geodynamic framework of the southwestern Tien Shan includes a structure of an arcuate plan view and a listric geometry which deepens to 40–45 km toward the center of the Fergana block. This pattern of the active zone agrees well with structural, paleomagnetic, and GPS data on the rotation of the Fergana block under the effect of pressure from the Pamirs.

MTS, conductivity anomaly, crustal conductor, present stress field, Talas-Fergana Fault, Fergana block, Tien Shan, Pamirs

ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых известных структур Тянь-Шаня [1—5] является Таласо-Ферганский разлом, который пересекает субширотную горную систему в диагональном направлении с хорошо проявленными признаками правостороннего сдвига. В современной морфологической структуре ТФР северо-западного простирается прослеживается более чем на 400 км вдоль Таласского и Ферганского хребтов и далее на территорию Китая. Амплитуда правостороннего смещения по ТФР в период с позднего миоцена оценивается более чем в 10 км, т. е. скорость смещения за последние 10 млн лет составляла около 10 см/год [3]. По данным GPS [6], в настоящее время ТФР неактивен, и максимальное правостороннее смещение по нему оценивается в 2—3 мм/год для северо-западной части разлома, тогда как для юго-восточной части оно близко к нулю. Структурный рисунок ТФР, результаты палеомагнитных исследований кайнозойских пород Тянь-Шаня свидетельствуют о том, что в кайнозое он ограничивал вращающийся Ферганский блок. Блок повернулся против часовой стрелки на 20—30° [4, 5], из чего можно оценить скорость смещения по ТФР в кайнозое от 10 до 15 см/год. Вращение блока продолжается и в настоящее время, но существ-

венных смещений по ТФР за время инструментальных измерений GPS не наблюдается [6]. В чем причина этого несоответствия?

Исследования последних лет [8—15] показали, что данные глубинного МТЗ приводят к качественно новым выводам, если они анализируются в рамках комплексных геофизических моделей тектоносферы в корреляции с геологическими данными. Глубинная магнитотеллурика направлена на изучение электропроводности консолидированной земной коры и верхней мантии. Она может дать важную информацию о флюидном режиме, зонах фазовых переходов и термодинамическом состоянии литосферы, степени и характере ее пористости, а также может принести дополнительную информацию для понимания современной геодинамической обстановки тектонически-активных регионов, в том числе выявления их глубинной структуры (коровых проводящих слоев).

На всей территории Тянь-Шаня коровый проводящий слой, залегающий на глубинах 20—35 км, редко до 45 км, поднимается к поверхности лишь в зоне Таласо-Ферганского разлома. К юго-западу от ТФР слой в форме листрического разлома погружается на юго-запад и предварительно рассматривался как детачмент надвиговых структур Памира [15]. В настоящей статье интерпретация аномалии электропроводности зоны ТФР в Юго-Западном Тянь-Шане рассматривается через представления вращательного движения Ферганского блока. Обсуждается вопрос о локализации современной активной границы Ферганского блока к юго-западу до 50 км от линии ТФР.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение глубинного строения Тянь-Шаня с помощью методов МТЗ и магнитовариационного зондирования (МВЗ) силами Научной станции РАН проводится уже более 20 лет. Было выполнено свыше 400 магнитотеллурических зондирований в диапазоне периодов от 0,1 до 1600 с и более 30 глубинных магнитотеллурических зондирований в диапазоне до 3000 с, регистрация магнитотеллурического поля

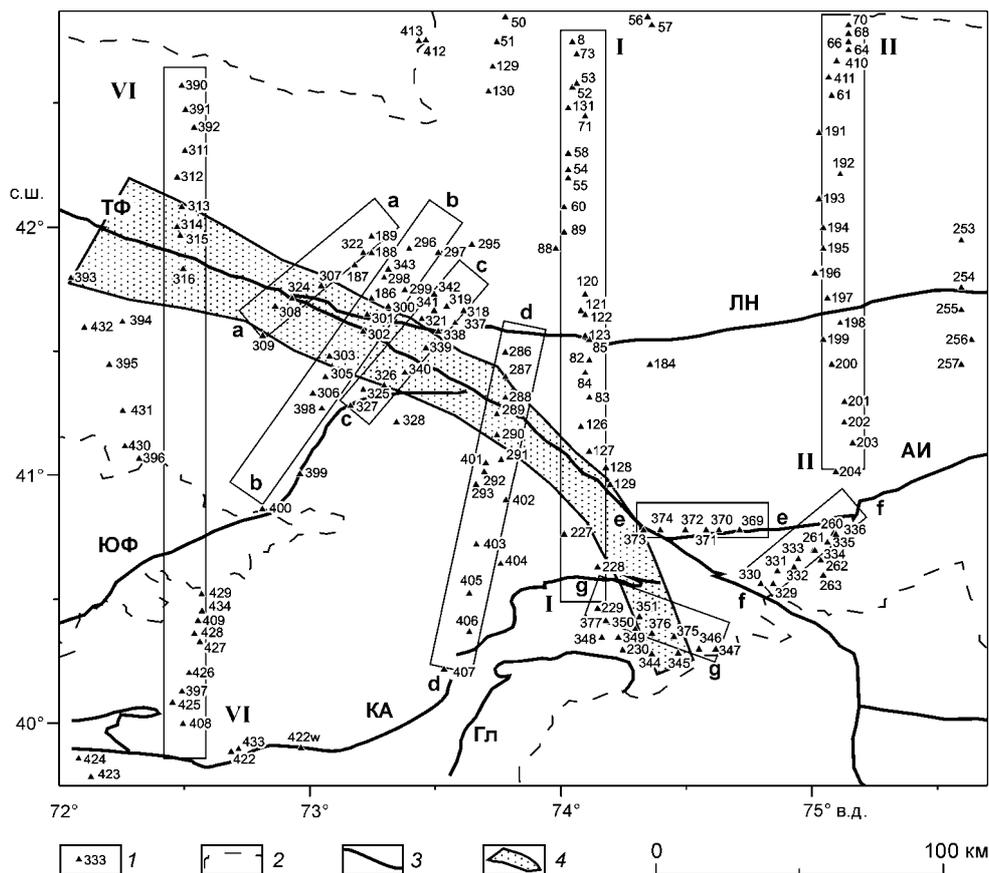


Рис. 1. Схема сети региональных (I—I, II—II, VI—VI) и локальных (а—а, б—б, с—с, d—d, е—е, f—f, g—g) профилей МТЗ в зоне Таласо-Ферганского разлома, а также расположенных на прилегающих площадях.

Профили МТЗ показаны прямоугольниками. 1 — пункты МТЗ, 2 — граница Киргизии, 3 — разломы: ТФ — Таласо-Ферганский, ЛН — Линия Николаева, АИ — Атбаш-Иныльчекский, ЮФ — Южно-Ферганский, КА — Кичик-Алайский, Гл — Гюльчинский; 4 — контуры аномалии электропроводности Таласо-Ферганского разлома.

Рис. 2. Геоэлектрические модели зоны Таласо-Ферганского разлома:

a — теоретическая двумерная (2D) модель, иллюстрирующая чувствительность поперечных кривых кажущегося сопротивления (ТМ-моды) к глубинным структурам [2]; *b* — схематическая стартовая 2D модель, составленная по результатам качественной интерпретации МТ-данных и априорной информации; *c*—*d* — геоэлектрические 2D модели строения земной коры по профилям *b*—*b*, *d*—*d*, *g*—*f*. Значения сопротивлений (Ом) указаны внутри блоков моделей; *1* — ориентированные кривые кажущегося сопротивления (цифрами указаны продольных и поперечных кривых), *2* — осадочный чехол, *3* — субвертикальные проводящие зоны, *4* — коровые проводящие зоны, *5* — высокоомный фундамент, *6* — астеносфера.

осуществлялась с помощью станций ЦЭС-2, МТ-ПИК, ИЗМИРАН-5, LIMS и МТ-24 ЕМІ. На основании интерпретации полученных данных зондирований была построена геоэлектрическая модель Тянь-Шаня, опубликованная ранее в работах [8—10, 14]. В настоящей статье для интерпретации используются данные, полученные по восьми профилям, секущим зону ТФР (рис. 1). По пяти сечениям были рассчитаны двумерные модели: три из них с помощью программ INV 2D (рис. 2), разработанных И.М. Варенцовым и Н.Г. Голубевым, и две — с помощью программы инверсии нового поколения П2DC тех же авторов [7]. Данные трех оставшихся сечений использовались только для качественной интерпретации в связи со значительной трехмерностью. Однако на всех сечениях (профилях) для поперечных кривых МТЗ наблюдается действие вытеснения поперечного тока из корового проводящего слоя к поверхности, описанное М.Н. Бердичевским [11]. Анализ данных МТЗ выполнен с использованием современных подходов, учитывающих наличие влияния локальных и региональных приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Инверсия наблюдаемых данных (см. рис. 2) выполнялась с помощью программ двумерного моделирования в соответствии с современными методиками интерпретации МТ-данных [8—12]. В связи с тем, что В.И. Дмитриевым доказана теорема единственности решения обратной задачи для МВЗ [13], в основе анализа экспериментальных данных лежит совместное исследование магнитотеллурического и магнитовариационного полей в широком диапазоне периодов. Необходимо отметить, что реально существующие магнитотеллурические данные зачастую свидетельствуют о существенно трехмерном характере аномальных структур, и в этом случае реализация методики двумерного моделирования возможна только при применении разложения тензора импеданса по собственным значениям и собственным направлениям. Не следует забывать и о том, что в сложных случаях двумерные модели лишь на качественном уровне могут аппроксимировать реальное строение геологической среды. Основные трудности при проведении работ методом МТЗ возникают из-за экранирующего действия плохопроводящих слоев литосферы и искажений, вызванных неоднородностями осадочного чехла. Это придает особую важность анализу МТ-данных (диагностике приповерхностных искажений, выделению глубинных структур) и их нормализации (сглаживанию геоэлектрического шума, исключению статических смещений и индукционных эффектов).

Основополагающей проблемой интерпретации глубинных МТЗ является решение вопроса о природе аномалий коровой электропроводности, поскольку именно этим определяется их роль в изучении геодинамических процессов и геологического строения Земли. В соответствии с современными представлениями о природе коровых проводящих слоев существует несколько возможных механизмов повышенной электропроводности: либо высокая электронная проводимость пород, слагающих верхнюю кору, либо ионная, связанная в основном с присутствием в породах воды и растворов солей или с частичным плавлением пород земной коры. В качестве электропроводящих пород, присутствующих в метаморфических комплексах фундамента, чаще всего встречаются углерод и сульфидсодержащие гнейсы и сланцы, включающие в себя пирит, пирротин, графит, иногда шунгит. Однако наиболее оправданной в нашем представлении является флюидная гипотеза возникновения аномальной электропроводности, особенно для тектонически-активных зон, таких как Центрально-Азиатский горный пояс, и может быть результатом проявления современной напряженности литосферы.

ГЛУБИННАЯ СТРУКТУРА ЗОНЫ ТАЛАСО-ФЕРГАНСКОГО РАЗЛОМА ПО ДАННЫМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате интерпретации и моделирования данных МТЗ выявлена аномалия электропроводности, приуроченная к зоне Таласо-Ферганского разлома (см. рис. 1), представляющая собой комбинацию коровых проводящих слоев Юго-Западного и Северо-Восточного Тянь-Шаня и субвертикальных проводящих структур (см. рис. 2). При этом использовалась идея проф. М.Н. Бердичевского о вытеснении поперечного тока и соответственной трансформации поперечных кривых МТЗ [11].

В Северо-Восточном Тянь-Шане (к северо-востоку от зоны ТФР) проводящий слой выделен в средней—нижней части коры. Он оценивается как двумерный с субширотной осью однородности, с глубиной залегания кровли от 35 до 20 км в направлении с севера на юг, а его суммарная продольная проводимость возрастает от 350—400 См в Чуйской впадине до 2000 См при приближении к Таримской плите [8, 9, 14]. Такое распределение

проводимости прекрасно иллюстрируется поведением векторов Визе, которые определяются по соотношению трех компонент геомагнитного поля в одной точке наблюдения, и характеризуют неоднородность распределения индуцированных в Земле электрических токов, а следовательно, и неоднородность распределения электропроводности. Для распространенного по территории Тянь-Шаня корового проводящего слоя векторы Визе (ReW) направлены перпендикулярно течению избыточных токов в нем. Наиболее наглядно поведение индукционных стрелок на периоде 1600 с, которые имеют повсеместно в Северо-Восточном Тянь-Шане северную ориентацию и значительную (соотношение вертикальной и горизонтальной компонент геомагнитного поля равно 0,2—0,3) длину ReW , что иллюстрирует возрастание проводимости по слою в южном направлении. Коровый проводник в Северо-Восточном Тянь-Шане трактуется как вязкопластичная зона, сформированная в результате вдавливания фундамента Таримского микроконтинента в средненижнюю часть земной коры как результат деформаций от Индо-Евразийской коллизии [15].

В настоящей статье наиболее детально рассматривается структура и геодинамическая интерпретация аномалии электропроводности, приуроченной к зоне ТФР. По структуре и морфологии аномалия подразделяется на три звена — Таласское, Центральное и Южное. Характерной особенностью Таласского звена аномалии является проявление в результатах моделирования сдвоенных субвертикальных и наклонных проводящих структур, указывающих на более сложное строение разломных зон.

В структурном плане аномалия электропроводности образует дугу протяженностью более 200 км, которая в северо-западной (Таласское звено) и юго-восточной (Южное звено) частях отклоняется от линии ТФР на 50—60 км.

Южное звено аномалии обнаруживается методом МТЗ (в геоэлектрической модели по профилю $g-f$ под отложениями Суякской впадины, в то время как линия ТФР отворачивает к востоку и сочленяется с зоной надвигов Тянь-Шаня на Таримскую впадину (см. рис. 1)). Доказательство того, что аномалия проходит под Суякской впадиной заключено в распределении векторов Визе для периода 16 с (рис. 3).

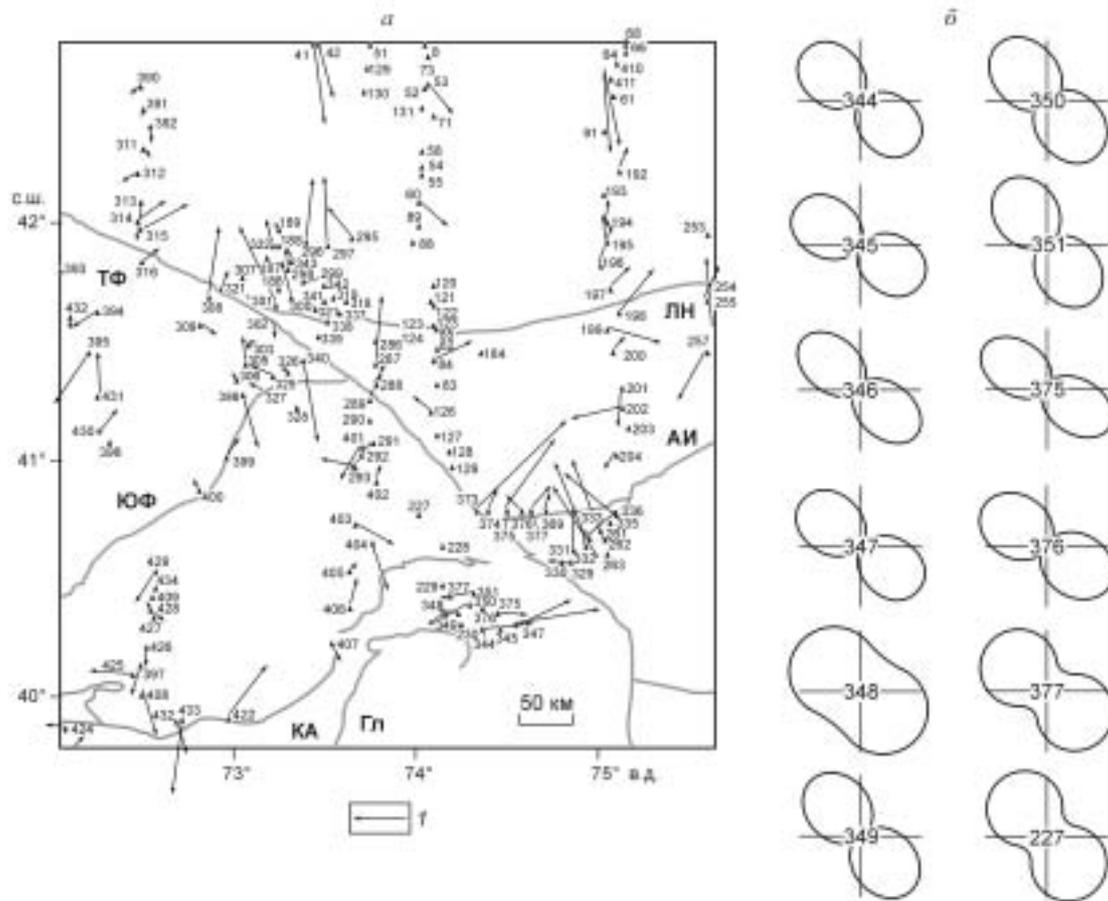
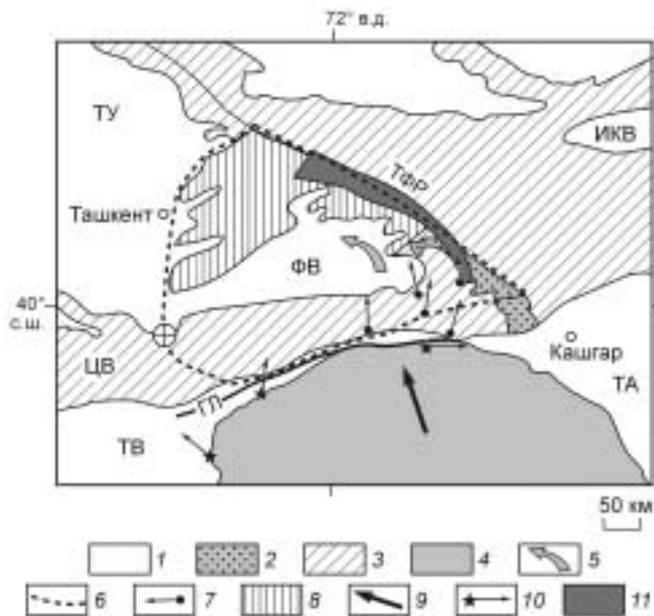


Рис. 3. Схема распределения реальных векторов Визе (ReW):

a — для периода $T = 16$ с, *b* — ориентация полярных диаграмм для района Суякской впадины (положение пункта МТЗ см. на рис. 1). *l* — векторы ReW длиной 0,2. Ост. усл. обозн. см. на рис. 1.

Рис. 4. Схема, иллюстрирующая поворот Ферганского блока (по [4] с дополнениями).

1 — кайнозойский чехол; 2 — юрские впадины, примыкающие к Таласо-Ферганскому разлому; 3 — Северо-Восточный Тянь-Шаньский блок; 4 — Памирский блок; 5 — направление предполагаемого вращения Ферганского блока; 6 — предполагаемая граница вращающегося блока, по [4]; 7 — пункты отбора образцов кайнозойских пород на палеомагнитный анализ; 8 — поднятия, компенсирующие вращение Ферганского блока; 9 — направление движения Памирского блока; 10 — пункты отбора образцов меловых пород на палеомагнитный анализ; 11 — контуры аномалии электропроводности Таласо-Ферганского разлома; ЦВ — предполагаемое положение центра вращения Ферганского блока в кайнозое по палеомагнитным данным. Геологические структуры: ИКВ — Иссык-Кульская впадина, ТФР — Таласо-Ферганский разлом, ТУ — Туранская плита, ФВ — Ферганская впадина, ТА — Таримская платформа, ГЛ — линия надвигов Губина, ТВ — Таджикская впадина.



Эти векторы для двумерной модели равны нулю над осью тока и ориентируются перпендикулярно ей по сторонам, выстраиваясь в восточной части Суяжской впадины по направлению к СВВ, а в западной части — к ЮЗЗ. Поведение импедансных полярных диаграмм также подтверждает двумерность аномалии под Суяжской впадиной и ее ориентацию на ЮЮЗ. Таким образом, меняя свое простирание с ЮЗ в районе западного замыкания Нарынской впадины на ЮЮЗ в Суяжской впадине, аномалия ТФР образует в плане плавную дугу. Этот факт представляет значительный интерес в связи с концепцией поворота против часовой стрелки Ферганского блока (рис. 4), выявленного по палеомагнитным данным и данным GPS [4—6]. С глубиной аномалия выполаживается к юго-западу до глубин 45 км к центру Ферганского блока.

Коровый проводящий слой интерпретируется (по комплексу геолого-геофизических данных) как глубинная зона срыва, участки подъема которой к поверхности располагаются в виде плавной дуги. Его морфология хорошо согласуется с моделью взаимодействия Памира и Тянь-Шаня, смещением фронта деформаций в северном направлении и поворотом Ферганского блока против часовой стрелки в результате этого взаимодействия. Тот факт, что наблюдаемая по магнитотеллурическим данным глубинная структура аномалии электропроводности не совпадает с плоскостью ТФР, хорошо объясняет, что в поле деформаций GPS, ТФР является слабоактивным. Эффект надвигания Памира к северу выражен в формировании изометричного Ферганского блока, вращающегося в кайнозое против часовой стрелки. Его современным ограничением на Тянь-Шане является зона корового проводника, которая представляет собой юго-западное крыло аномалии электропроводности, структурно и пространственно не совпадающая с плоскостью ТФР. Современный центр вращения Ферганского блока смещен на восток почти на 250 км от усредненного за кайнозойский период центра вращения, вычисленного по палеомагнитным данным. Это обстоятельство позволяет ставить вопрос о возможной смене геодинамического режима на Тянь-Шане, произошедшей, вероятно, в голоцене, что сказалось также в слабой активности отдельных участков ТФР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования и интерпретации данных магнитотеллурических зондирований в зоне Таласо-Ферганского разлома выделена структура, состоящая из коровых проводников Юго-Западного и Северо-Восточного Тянь-Шаня, поднимающихся к поверхности вблизи зоны ТФР и полого погружающихся в разные стороны от него. В плане зона аномалии коровой электропроводности Юго-Западного Тянь-Шаня образует дугу. Она структурно и пространственно не совпадает с плоскостью ТФР. Этот факт представляет значительный интерес в связи с подтверждением концепции выявленного по геологическим и палеомагнитным данным, а также данным GPS поворота Ферганского блока против часовой стрелки. По направлению к центру Ферганского блока аномалия выполаживается до 45 км глубины и трассирует его современное активное ограничение. Структура и положение этого корового проводящего слоя, интерпретируемого по комплексу геолого-геофизических данных как глубинная зона срыва, хорошо согласуются с моделью поворота Ферганского блока против часовой стрелки в результате давления Памира на север. Наблюдаемая по магнитотеллурическим данным глубинная структура аномалии электропроводности Юго-Западного Тянь-Шаня не совпадает с плоскостью ТФР, что хорошо объясняет слабую активность ТФР в современном поле деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буртман В.С. Таласо-Ферганский сдвиг (Тянь-Шань). М., Наука, 1964, 144 с.
2. Буртман В.С., Скобелев С.Ф., Сулержицкий Л.Д. Таласо-Ферганский разлом: современные смещения в Чаткальском районе Тянь-Шаня // Докл. АН СССР, 1975, т. 296, № 5, с. 1173—1176.
3. Burtman V.S., Skobelev S.F., Molnar P. Late Cenozoic slip on the Talas-Ferghana faults, the Tian Shan, Central Asia // Geol. Soc. Amer. Bull., 1996, v. 108, p. 1004—1021.
4. Vazhenov M.L. Cretaceous paleomagnetism of the Fergana Basin and adjacent ranges, central Asia: tectonic implications // Tectonophysics, 1993, v. 221, p. 251—267.
5. Thomas J.C., Lanza R., Kazansky A. et al. Paleomagnetic study of Cenozoic sediments from the Zaisan basin (SE Kazakhstan) and the Chuya depression (Siberian Altai): tectonic implications for central Asia // Tectonophysics, 2002, v. 351, p. 119—137.
6. Миди Б.Дж., Хагер Б.Х. Современное распределение деформации в Западном Тянь-Шане по блоковым моделям, основанным на геофизических данных // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (10), с. 1622—1633.
7. Варенцов Ив.М. Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах // Физика Земли, 2002, № 11, с. 11—33.
8. Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю. и др. Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли, 1997, № 1, с. 3—20.
9. Рыбин А.К. Глубинные электромагнитные зондирования в Центральной части Киргизского Тянь-Шаня: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., МГУ, 2001, 20 с.
10. Баталев В.Ю. Глубинное строение и геодинамика западной части Киргизского Тянь-Шаня по данным магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, ОИГТМ СО РАН, 2002, 39 с.
11. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М., Изд-во Моск. ун-та, 1997, 161 с.
12. Бердичевский М.Н., Куликов В.А. Чувствительность глубинного магнитотеллурического зондирования в присутствии флюидонасыщенных разломов // Физика Земли, 1994, № 6, с. 39—49.
13. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцова Н.С. и др. Магнитовариационное зондирование: новые возможности // Физика Земли, 2003, № 9, с. 3—30.
14. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г. и др. На пути построения трехмерной геоэлектрической модели земной коры и верхней мантии Тянь-Шаня // Материалы Второго международного симпозиума „Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов“. М.; Бишкек, 2003, с. 164—179.
15. Buslov M.M., Klerkx J., Abdarakmatov K. et al. Recent strike-slip deformation of the northern Tien-Shan / Eds. F. Stori, R.E. Holdsworth, F. Salvini. Intraplate strike-slip deformation belts // Geol. Soc. London. Spec. Publ., 2003, v. 210, p. 53—64.

*Рекомендована к печати 20 июля 2005 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
20 января 2005 г.*