

## Верхнекоровые структурно-морфологические ансамбли Памиро-Тянь-Шаньского сегмента Центральной Азии и их отражение в геофизических полях<sup>\*</sup>

А. К. Рыбин<sup>1</sup>, М. Г. Леонов<sup>2</sup>, Е. С. Пржиялговский<sup>2</sup>, В. Ю. Баталев<sup>1</sup>,  
Е. А. Баталева<sup>1</sup>, В. Е. Матюков<sup>1</sup>, Е. В. Лаврушина<sup>2</sup>,  
О. Б. Забинякова<sup>1</sup>, Г. Г. Щелочков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научная станция РАН в г. Бишкеке,  
Кыргызская Республика, 720049, Бишкек-49

<sup>2</sup> Геологический институт РАН,  
Российская Федерация, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7

**Для цитирования:** Рыбин А.К., Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Лаврушина Е.В., Забинякова О.Б., Щелочков Г.Г. Верхнекоровые структурно-морфологические ансамбли Памиро-Тянь-Шаньского сегмента Центральной Азии и их отражение в геофизических полях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 4. С. 478–501. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.405>

В работе рассмотрены поверхностные структурно-морфологические ансамбли различного ранга Памиро-Тянь-Шаньского сегмента Центральной Азии и возможная их корреляция с данными дистанционных геофизических исследований. Обсуждены результаты анализа такой корреляции. Яркий пример морфоструктур межрегионального масштаба на Евразийском материке — горные сооружения Памира и Тянь-Шаня — две различные историко-структурно-геологические провинции, различающиеся конфигурацией, внутренним строением, особенностями эволюции и орогенеза. В работе представлены результаты комплексного изучения глубинной структуры литосферы Южного Тянь-Шаня и Памира вдоль профиля TIRAGE. Анализ распределения геофизических неоднородностей в профильном разрезе свидетельствует о том, что глубинное строение Южного Тянь-Шаня и Памира существенно различается. Морфоструктуры регионального масштаба и их отражение в данных детальных магнитотеллурических зондирований (МТЗ) рассмотрены на основе результатов геолого-геофизического изучения тектонических зон Тянь-Шаня: Кочкорской впадины и системы Нарынская впадина—хребет Байбичетоо—Атбашинская впадина. Установлена хорошая корреляция поверхностной структуры, определенной геоморфологическими и структурными методами, с глубинным геоэлектрическим разрезом в этих районах, построенным по результатам МТЗ высокого разрешения. Также в работе рассмотрены примеры морфоструктур локально-регионального масштаба, мезо- и микромасштабов, выявленные авторами в ходе изучения структурных особенностей тектонических блоков и породных массивов Северного Тянь-Шаня. Все представленные в работе примеры корреляции поверхностных и глубинных структур свидетельствуют о парагенетическом единстве разномасштабных тектониче-

<sup>\*</sup> Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10059) на Научной станции РАН в г. Бишкеке.

ских структур, выявленных геологическими и геофизическими методами в пределах крупных тектонически однородных сегментов земной коры Тянь-Шаня и Памира.

*Ключевые слова:* верхнекоровые структурно-морфологические ансамбли, глубинные магнитотеллурические зондирования, геофизическая модель, сейсмичность, геодинамика, Тянь-Шань, Памир.

## **Введение**

Выявление приповерхностных морфоструктурных ансамблей и соответствующих им верхнекоровых и глубинных структурно-вещественных неоднородностей (там, где это представляется возможным), а также их комплексная геолого-геофизическая характеристика представляют собой одну из наиболее актуальных задач современной тектоники и геодинамики. Особую значимость ее решение имеет для изучения внутриконтинентальных орогенов, развивающихся в альпийское и Новейшее время, так как именно этот этап — ключевой для понимания и оценки фундаментальных проблем геодинамики современной земной коры, а также ее минералогического потенциала и выявления геоэкологических рисков. Большой интерес для таких исследований представляет высокогорный Памиро-Тянь-Шаньский сегмент Центральной Азии с многокилометровыми врезами рельефа, выразительной скульптурой и строением.

## **1. Методология исследований**

В настоящее время не представляется возможным учесть многообразие морфоструктурных сегментов и их взаимосвязей, а также установить их соответствие данным глубинного зондирования, создав единую схему региона, но реальные предпосылки для проведения такой работы имеются, и они в определенной мере заложены исследованиями коллектива геологов и геофизиков — авторов данной работы. Решение поставленной задачи основано на проведении следующего комплекса исследований:

- 1) изучения геолого-структурных особенностей, отражающих строение породных масс на разном уровне размерности (от микро- до мегаструктур) и разного уровня заложения (от литосферных до внутрипородных);
- 2) выявления и характеристики типоморфных морфоструктурных и геодинамических ансамблей;
- 3) изучения глубинного строения методами дистанционного анализа (сейсмика, магнитотеллурика, космическая геодезия и др.);
- 4) совокупного анализа и корреляции поверхностной структуры, морфологии и глубинного строения территории.

В статье рассмотрены структурно-морфологические ансамбли различного ранга, отражающие особенности поверхностного выражения тектонических процессов, и возможная их корреляция с данными дистанционных геофизических исследований.

## 2. Морфоструктурные ансамбли Памиро-Тянь-Шаньского сегмента Азии

### 2.1. Морфоструктуры межрегионального масштаба и масштаба геодинамических провинций литосферного и верхнемантийного заложения

Одна из наиболее ярких черт новейшей геодинамики — орогенез, проявившийся на огромных пространствах Евразийского континента. При этом орогенические процессы охватили сегменты земной коры, характеризующиеся различной инфра- и морфоструктурой, историей развития и возрастом консолидации. Показательный пример этого процесса — горные сооружения Памира и Тянь-Шаня — две различные историко-структурно-геологические провинции, различающиеся конфигурацией, внутренним строением, особенностями эволюции и орогенеза (рис. 1).

В современной структуре и орографии Гиссаро-Алай и Памир четко разграничены. Гиссаро-Алай входит в состав Центрально-Азиатского (Урало-Монгольского) подвижного пояса. Памир (в орографических рамках) — это композитное сооружение, состоящее из двух сегментов:

- 1) северного (Северный Памир), который на герцинском и киммерийском этапах принадлежал Азиатскому блоку и составлял с Гиссаро-Алаем единое целое;
- 2) южного (Центральный и Южный Памир), тяготеющего к Альпийско-Гималайскому подвижному поясу.

При этом если Гиссаро-Алай по своей геометрии и новейшей инфраструктуре логично вписывается в ансамбль горных сооружений Центрально-Азиатского пояса, то Памир представляет собой особую геоморфологическую провинцию, аномальную и для Центрально-Азиатского пояса, и для Альпийско-Гималайского, резко выделяясь на общем морфоструктурном фоне Центральной Азии.

Данные по глубинному строению Гиссаро-Алая и Памира<sup>1</sup> увязываются с внешними формами, общим геологическим строением, элементами инфра- и морфоструктуры и характером структурных ограничений этих горных сооружений. Глубинное строение Памира и Гиссаро-Алая существенно различается.

Гиссаро-Алаю свойственны следующие признаки:

- наличие под всей территорией горного сооружения относительно однотипной коры и литосферной мантии евроазиатского типа;
- определенная геодинамическая согласованность структуры коры и мантии, а также преемственность современной морфоструктуры и структурных форм, отражающих деформацию поверхности палеозойского фундамента;
- отсутствие структурно проявленных региональных внутрикоровых деталей;
- четко линейное расположение мантийно-коровых структурно-вещественных неоднородностей;
- горизонтально-плоскостное расположение сейсмофокальных зон, отсутствие глубокофокусных землетрясений.

<sup>1</sup> Библиографию по теме см. в работе (Леонов и др., 2017).

Для Памира характерны:

- пространственное (латеральное и вертикальное) совмещение Индийской и Евразийской литосферных масс и их фрагментов (Таримская и Афгано-Таджикская массы);
- воронкообразное распределение сейсмофокальных зон под Памиром, наличие глубокофокусных землетрясений;
- наличие структурной дисгармонии и детачментов в пределах верхней коры (раздел фундамент/аллохтонный чехол, отщепление нижней коры) и в основании коры по поверхности Мохоровичича.

О различии между Гиссаро-Алаем и Памиром свидетельствует также разная мощность земной коры под этими сооружениями, причем земная кора Памира значительно утолщена в сравнении с нормальной корой континентального типа. Добавим к указанному, что характер распределения геоэлектрических неоднородностей и соответствующих им типов деформаций в литосфере Северного Памира определяют однонаправленное движение горных масс только в диапазоне глубин 0–20 км, т. е. в пределах слоистых слабокомпетентных толщ. Гиссаро-Алай и Памир развивались во многом независимо и не оказывали друг на друга сколько-нибудь заметного геодинамического влияния на уровне корового слоя и, возможно, на уровне литосферной мантии (Леонов и др., 2017).

Эта категория морфоструктур практически всегда находит свое отражение в геофизических полях, что можно проиллюстрировать на примере комплексных геофизических исследований по трансекту TIRAGE, осуществленных в рамках мультисциплинарной программы изучения геодинамики Южного Тянь-Шаня и Памира (рис. 2 и 3).

Характер распределения геоэлектрических и сейсмических (скоростных) неоднородностей вдоль трансекта TIRAGE отражает происходящие в литосфере Тянь-Шаня и Памира геодинамические процессы, в частности сейсмичность (рис. 3, в). В 45-километровой полосе вдоль линии трансекта на тянь-шаньском участке все очаги землетрясений залегают в верхней и средней частях земной коры (на глубинах менее 30 км), тогда как на памирском участке землетрясения происходят на глубинах до 200 км. Это можно объяснить существованием различных геодинамических обстановок в литосфере Тянь-Шаня и Памира, что отражено в геодинамических моделях (см. рис. 1).

Рассмотреть весь комплекс геолого-геофизических данных по трансекту TIRAGE в рамках статьи не представляется возможным — их изложение и анализ содержатся в работах (Матюков, 2013; Sass et al., 2014; Рыбин и др., 2015; Леонов и др., 2017). Здесь мы приведем лишь данные, полученные на основе результатов магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и их корреляции с поверхностной структурой региона в пределах Памира (рис. 4 и 5).

В геоэлектрическом разрезе, построенном вдоль трансекта TIRAGE, просматриваются три горизонта, которые разграничены субгоризонтальными структурными разделами и которые имеют разное распределение геоэлектрических неоднородностей, соответствующих различному структурно-вещественному состоянию горных масс (рис. 5). Верхний слой (мощностью 7–10 км) имеет субгоризонтальную ориентировку неоднородностей. Ниже (в интервале глубин до 15–20 км) расположен горизонт, на котором горизонтально-плоскостная структура полей становится



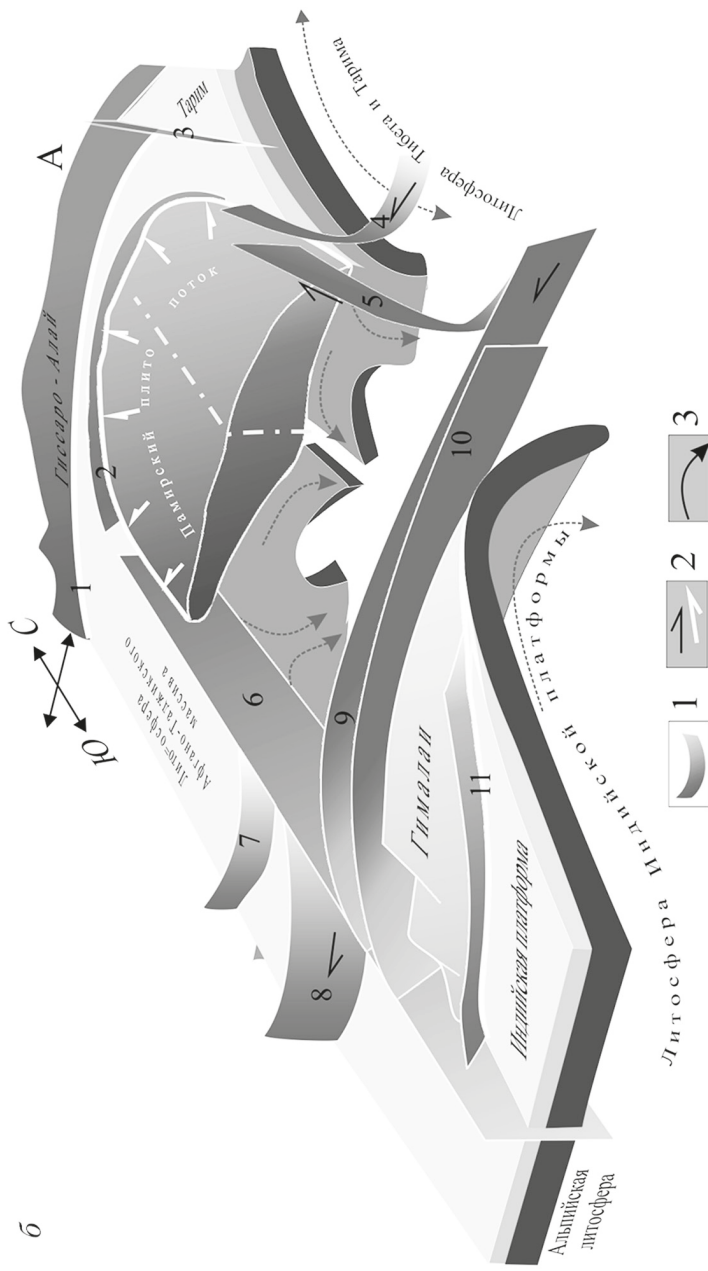


Рис. 1. Схемы альпийской геодинамики Южного Тянь-Шаня (на примере Гиссаро-Алайской области) (а) и Памиро-Гималайского сегмента литосферы Азии (б) (подробная аргументация моделирования приведены в работе (Леонов и др., 2017)):

а: 1 — разломы; 2 — предполагаемые направления течения горных масс астеносферы; 4 — площадь резкого изменения значений удельного сопротивления по данным МТЗ; 5 — скорость сейсмических волн; 6 — значения плотности горных пород; 7 — значения удельного сопротивления горных пород; б: 1 — главные разломы; 2 — направление движения горных масс; 3 — направление движения нижнекоровых и литосферных масс. Цифры 1-11 — разломы: 1 — система Южно-Гиссарского, Вахского и Кокшаальского разломов; 2 — Дарваз-Каракульский и Главный Памирский; 3 — Таласо-Ферганский; 4 — Алтынтагский; 5 — Памирско-Каракурумский; 6 — Чаманско-Памирский; 7 — Телемазарский; 8 — Гератский; 9 — Индукуш-Каракурумский; 10 — структурный шов Инда; 11 — Главный пограничный разлом Гималаев





Рис. 2. Расположение профиля TIRAGE:

1 — пункты профиля МТЗ; 2 — населенные пункты;  
3 — государственные границы

менее четкой и ориентированной. И, наконец, ниже глубин 15–20 км преобладают неоднородности изометричной или овальной формы с субгоризонтальной и субвертикальной ориентировкой длинных осей. Горизонтально-плоскостной рисунок распределения электропроводящих свойств верхнего горизонта коры согласуется с инфраструктурой верхнекорового слоя Памира, выраженной в наличии пакетов аллохтонных пластин, лежащих складок, пологих зон расланцевания и милонитизации, плоской форме гранитных массивов (Сусин и Верхотуров, 1984), и именно к этим глубинам приурочен, по данным МТЗ, слой повышенной электрической проводимости (Sass et al., 2014).

Изменение рисунка распределения электропроводящих свойств во втором сверху горизонте, по-видимому, объясняется присутствием в нем значительных фрагментов консолидированной коры, тектонически оторванных от основного массива и включенных в аллохтонные пакеты, тогда как в верхних аллохтонах и чехольном комплексе их присутствие минимально и не оказывает существенного

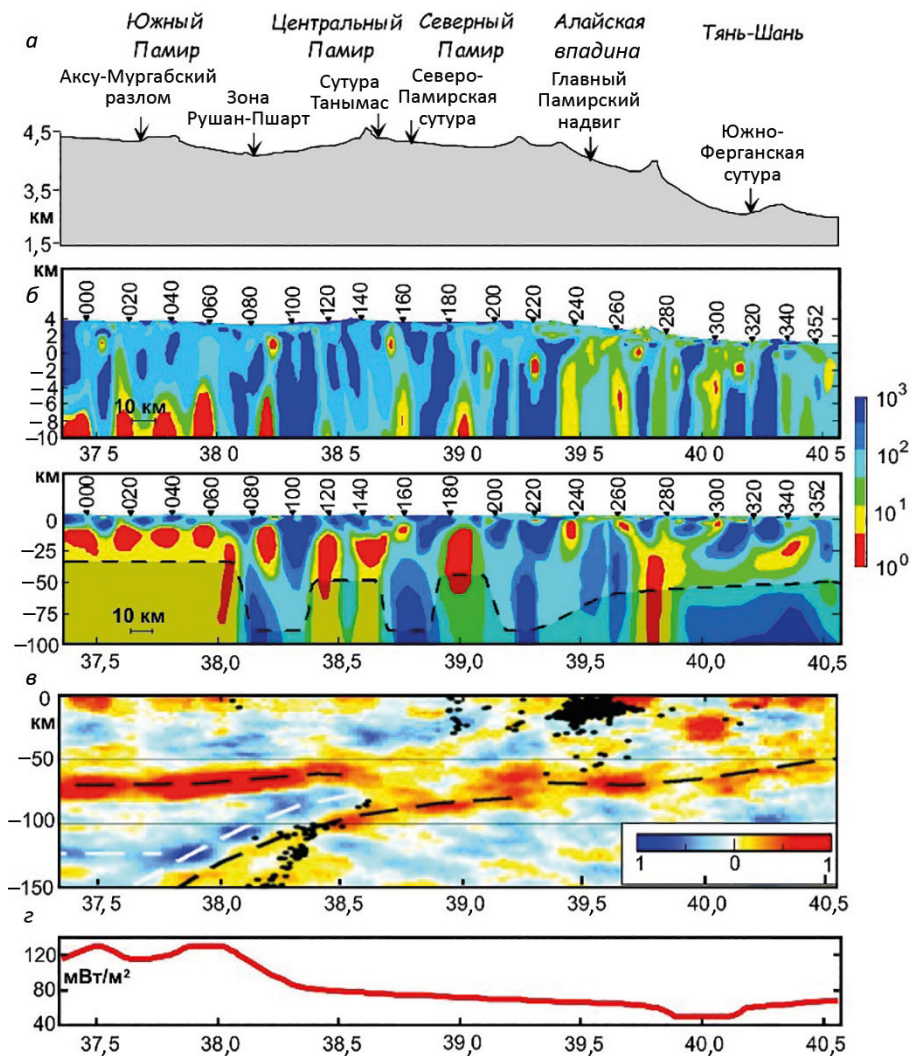


Рис. 3. Глубинное строение Южного Тянь-Шаня и Памира вдоль профиля TIRAGE:

а — рельеф вдоль линии профиля с указанием сутурных швов и разломных зон; б — геоэлектрический разрез, вверху показаны номера точек МТЗ, пунктиром отмечена граница разрешения метода МТЗ по глубине (с учетом экранирующего действия вышележащих проводящих структур разреза) (Матюков, 2013; Sass et al., 2014), справа дана логарифмическая шкала градаций удельных электрических сопротивлений, Ом·м; в — сейсмический разрез (Schneider et al., 2013) и гипоцентры землетрясений в 45-километровой полосе вдоль профиля (Sippl et al., 2013); з — распределение теплового потока вдоль профиля (Duchkov et al., 2001)

влияния на распределение электропроводящих свойств. Расположение фрагментов с различной электрической проводимостью в нижнем горизонте (на глубинах 20-100 км) связано, вероятно, с относительно гомогенной структурой консолидированной коры, проявлением объемного тектонического течения в фундаменте (Рыбин и др., 2015) и потоками глубинных минерализованных флюидов, которые,



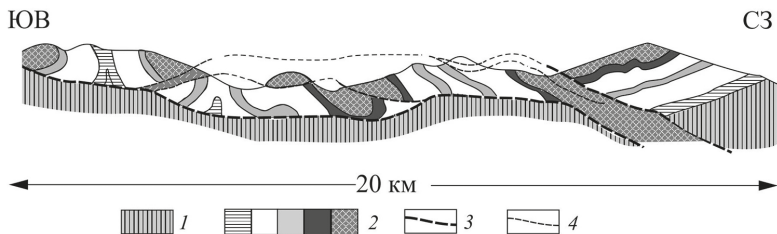


Рис. 4. Субгоризонтальные аллохтонные пластины (тектонические покровы и лежащие складки) Юго-Восточного Памира (см. (Руженцев, 1971), схематизировано):

1 — параавтохтон (отложения перми и триаса); 2 — аллохтон (различные горизонты юрского разреза); 3 — поверхность главного дисгармоничного срыва (шарьяжа); 4 — второстепенные надвижки и покровы

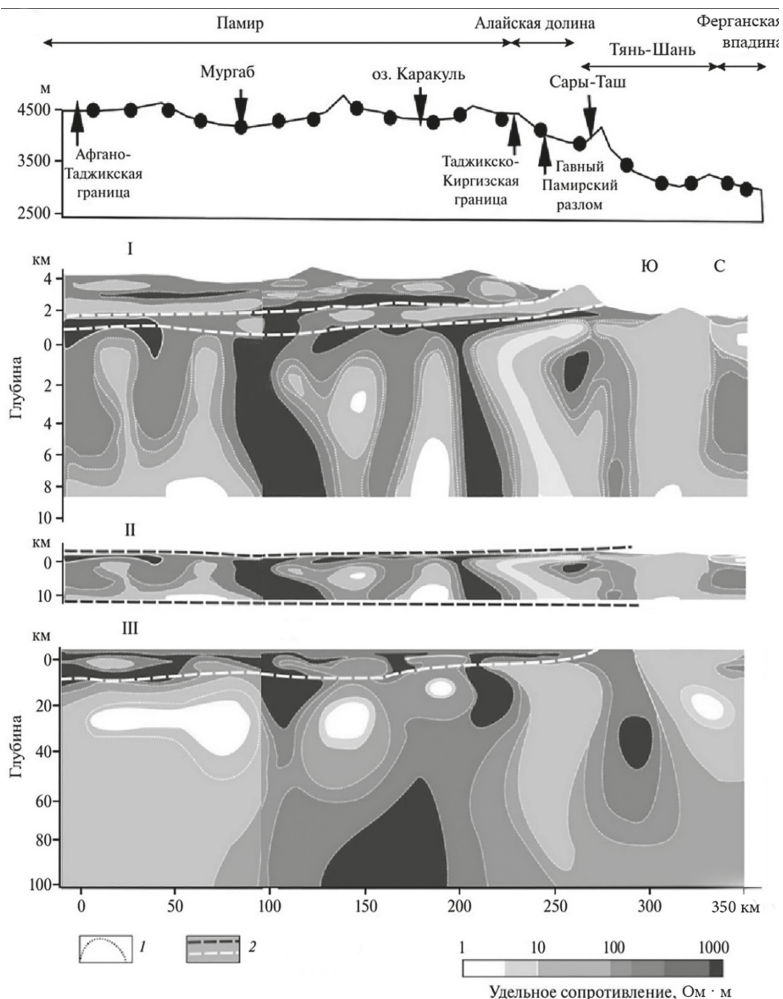


Рис. 5. Геоэлектрический разрез (см. (Матюков, 2013; Sass et al., 2014)), интерпретирован авторами статьи:

1 — изолинии равного удельного электрического сопротивления; 2 — границы зон I–III с различным распределением электрических свойств (см. пояснения в тексте); I — малоглубинный профиль (высокочастотный спектр МТ-поля); II — малоглубинный профиль в масштабе, приближенном к масштабу глубинного; III — глубинный профиль (низкочастотный спектр МТ-поля)

не изменяя структуру коры, влияют на распределение электропроводящих свойств горных пород, как это было показано на примере Афгано-Таджикской впадины в работах (Аптикаева и др., 1994; Лукк и Шевченко, 2004). Дискордантное положение двух верхних горизонтов относительно подстилающих пород указывает также на существование на их границе тектонического срыва, который служит экраном, не позволяющим минерализованным глубинным флюидам проникать в верхние горизонты коры. Последний факт, возможно, объясняет бедность Памира металлическими полезными ископаемыми. Но в границах Памира и сопредельных территорий широко распространена метасоматическая верхнекоревая минерализация, связанная с гранитоидным магматизмом. Отметим также, что верхние два горизонта «уходят в воздух» на границе с Алайской долиной и не имеют продолжения в Гиссаро-Алае, где распределение геоэлектрических неоднородностей не отличается от такового на третьем горизонте Памира.

Анализ распределения геофизических неоднородностей (аномальных объектов) в земной коре и верхней мантии вдоль трансекта TIPAGE свидетельствует о том, что глубинное строение Южного Тянь-Шаня (Гиссаро-Алай) и Памира существенно различается.

## *2.2. Морфоструктуры регионального масштаба: коровые сегменты геодинамических провинций, тектонические зоны и их крупные фрагменты*

К морфоструктурам этого типа в регионе прежде всего относятся меж- и внутригорные впадины, антиклинорные выступы палеозойско-докембрийских пород и наиболее протяженные линейные зоны концентрации новейших деформаций, отражающие тектоническую делимость корового слоя. Например, тектонические зоны Северного и Центрального Тянь-Шаня: Кочкорская впадина и система Нарынская впадина—хребет Байбичетоо—Атбашинская впадина. Морфоструктуры этого ранга могут быть отражены в данных, полученных методами малоглубинной геофизики (МТЗ высокого разрешения, гравиметрических и сейсмических данных).

Эти районы детально изучены при помощи геоморфологических и структурных методов, результаты скоррелированы с данными профильных работ МТЗ высокого разрешения (Bataleva et al., 2017; Przhivalgovskii et al., 2018; Rybin et al., 2018).

Структура палеоген-неогеновых отложений, перекрытых современными рыхлыми осадками, а также осадками, расположенными под надвигами палеозойского фундамента в крутых бортах Кочкорской впадины, была определена с привлечением данных профильных МТЗ как продолжение ранее выполненных МТЗ в этом районе (Park et al., 2003; Рыбин, 2011). В результате была построена геоэлектрическая двумерная модель по профилю Укок (рис. 6 и 7), позволившая выявить особенности геоэлектрического строения осадочного чехла и фундамента южного борта Кочкорской впадины. В частности, предполагается, что электропроводящие структуры, обозначенные на рис. 7 цифрами 4 и 5 (объекты 4 и 5), соответствуют ветвям Южно-Кочкорского разлома (ЮКР). Исходя из морфологии проводящих структур и значений электрического сопротивления, мы предполагаем, что высокая электрическая проводимость объектов 4 и 5 связана с их повышенной тре-

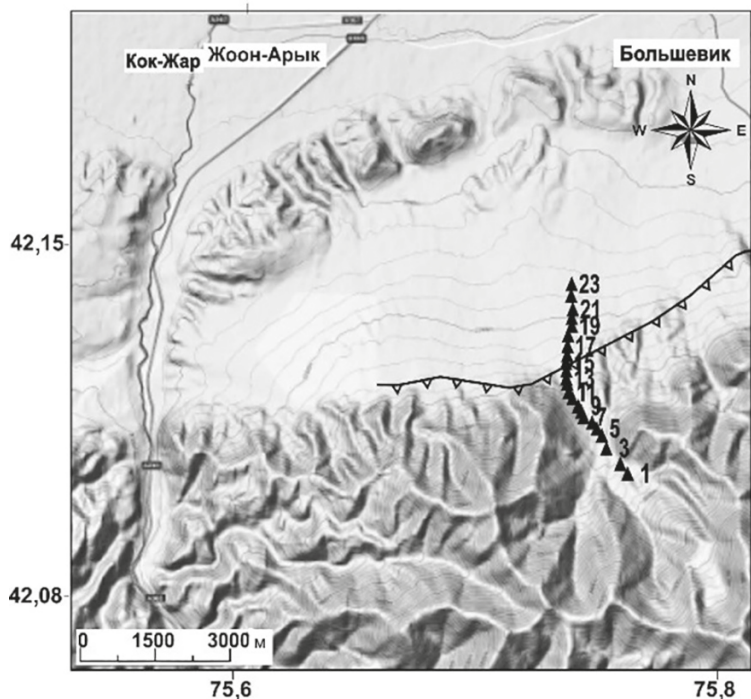


Рис. 6. Расположение профиля Укок.

Цифры 1–23 — пункты МТ-зондирований, линия с треугольниками — зона сочленения Киргизского хребта и Кочкорской впадины

щииноватостью и обводненностью. Наличие субвертикальных неоднородностей с очень низким удельным сопротивлением (менее 10 Ом·м) является следствием современной активизации систем разломов Тянь-Шаня. Геоэлектрические неоднородности объектов 1–3 можно связать с областями катаклаза гранитов. Объект 6 соответствует кайнозойским отложениям, мощность которых составляет около 1,5 км. Простираение ветвей разломов (объекты 4 и 5) в среднем составляет 60–65°.

Для рисунка геоэлектрической структуры гранитоидов фундамента (рис. 6 и 7) характерны контрастные по электропроводности крутопадающие плоскостные зоны, вероятно, подчеркивающие систему разноранговых структур дезинтеграции гранитоидов в крутом борту Кочкорской впадины. О геоэлектрических свойствах осадочного чехла в целом можно судить по его структуре на профилях МТЗ во внутренней части впадины. Для мощной толщи залегающего выше осадочного чехла характерен малоконтрастный рисунок распределения электрической проводимости, в целом более высокой, чем в фундаменте. Низкие сопротивления пород центральной части разреза (возможно, соленосных) позволяют видеть структуру полого чехла, залегающего на этом участке. Для грубообломочных, плохо сортированных отложений верхов разреза характерны повышенные значения сопротивлений.

В геоэлектрической модели области спокойного залегания кайнозойского чехла (объект 6) и выходящих на поверхность гранитов фундамента (объекты 1–4 и, возможно, объект 5) разделены зоной неупорядоченной геоэлектрической струк-

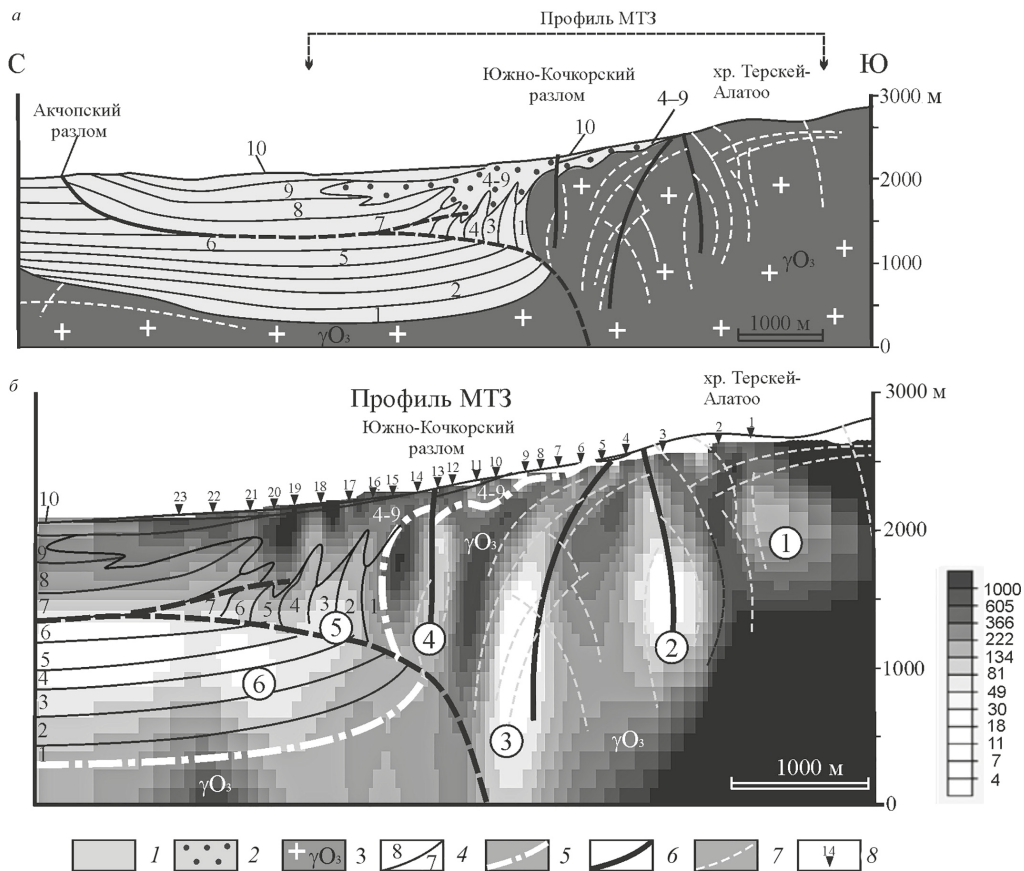


Рис. 7. Взаимоотношение поверхностной структуры и глубинного строения южного борта Кочкорской впадины (Северный Тянь-Шань):

*a* — схематизированный геологический разрез (Przhiyalgovskii et al., 2018); *б* — геоэлектрический разрез по данным МТЗ высокого разрешения (Bataleva et al., 2017); 1–3 — структурно-литологические комплексы на геологическом разрезе: 1 — палеоген-неогеновые отложения чехольного комплекса, 2 — грубообломочные фации неогеновых отложений чехольного комплекса, 3 — позднеордовикские граниты фундамента ( $\gamma Q_3$ ), 4 — границы пачек осадочного чехла и их номера (описание втексте), 5 — подошва комплекса осадочного чехла, 6 — разломы (пунктир — предполагаемые), 7 зоны трещиноватости, 8 — пункты МТЗ (от 1 до 23, см. Рис. 6); шкала справа — градация удельных электрических сопротивлений, Ом·м; цифры в кружках (от 1 до 6) — электропроводящие структуры

туры на их контакте — в зоне ЮКР. Корни субвертикальных низкоомных аномалий в гранитах ограничиваются наклонной линией, соответствующей, вероятно, плоскости главного сместителя ЮКР. Последний на глубине сливается с мощной зоной вертикальной проницаемости, которая соответствует масштабной структуре корового ранга (ее геологическая природа остается дискуссионной). Наклоненные внутрь впадины структуры (между объектами 6 и 5) соответствуют зоне подворота слоев чехла, возможно меланжированных на контакте с гранитами. Наиболее амплитудное смещение кровли палеозойского фундамента в зоне ЮКР происходит как пластичная флексурно-складчатая деформация, осложненная взбросами и надвигами. Переход наклонных взбросов в более крутые структуры на глубине

определяется векторами перемещения масс на границах растущих выступов фундамента и погружающихся бассейнов.

Геолого-геофизические исследования в Кочкорской впадине позволили существенно уточнить инфраструктуру корового слоя региона и установить хорошую сходимость геолого-структурных данных и результатов МТЗ. При этом геоэлектрический разрез крутого борга впадины отражает сложную систему складчатых и разломных структур Южно-Кочкорской тектонической зоны. Распределение электрического сопротивления приводит нас к выводу о том, что деформации кровли фундамента имели преимущественно пластичный характер и проявились в тектонической структуре козырьковыми складками с опрокинутыми стратиграфическими контактами фундамент/чехол и сложной геометрией поверхности блоков фундамента в ложе впадины. Амплитуды смещений по взбросам, определенные в зоне ЮКР, не превышают 400–500 м, что значительно меньше общего размаха вертикального смещения кровли палеозойского фундамента на границе Кочкорской впадины и Терской антиклинория. Эти определения заметно меньше полученных ранее (Park et al., 2003) оценок надвигания палеозойских пород в южном борту Кочкорской впадины.

На основе описанного в статье (Morozov et al., 2014) детального структурно-геологического картирования и кинематического анализа ключевых участков в пределах системы Нарынская впадина—хребет Байбичетоо—Атбашинская впадина (кайнозойские впадины и их палеозойское обрамление) были оценены геодинамические условия формирования и эволюции этих бассейновых структур. Принимая во внимание однотипность и неразрывность геологических структур Нарынской и Атбашинской впадин, авторы статьи (Morozov et al., 2014) допускают вариант существования ранее единой впадины. Палеозойский хребет Байбичетоо, разделяющий впадины, может быть подобен внутренним поднятиям фундамента во впадинах. Чтобы подтвердить эту гипотезу, были проведены геофизические исследования по методу МТЗ (Rybin et al., 2018). Результирующая двумерная геоэлектрическая модель разреза вдоль профиля Карабук свидетельствует о том, что рассчитанные по ней данные достаточно хорошо согласуются с результатами геологических исследований (рис. 8–10). Скрытые разломные структуры фундамента, показанные в геологическом разрезе Нарынской впадины, в геоэлектрической модели отображаются в виде наклонных и субвертикальных проводящих объектов шириной до 1,5–2,0 км. Внутренние поднятия фундамента в Нарынской впадине — структуры (объекты 1–3) геологического разреза — также четко отображены в геоэлектрической модели в виде соответствующих блоков (см. рис. 9 и 10). Линейный выступ палеозойского хребта Байбичетоо (объект 4), разделяющего впадины и являющегося одной из ключевых структур геологического разреза, занимает центральное место и в геоэлектрическом разрезе, в котором он представлен высокоомным объектом с наклоном к северо-западу, шириной порядка 10 км, с глубиной залегания до верхней кромки проводящего слоя в коре. Коровый проводящий слой sporadически распространен в средней — нижней коре на территории всего Тянь-Шаня, его глубина залегания в районе исследования — 25–30 км.

Основные структурные элементы поверхности фундамента и осадочного чехла Атбашинской впадины в геологическом разрезе имеют более сложный характер по сравнению с аналогичными элементами в Нарынской впадине. Об этом



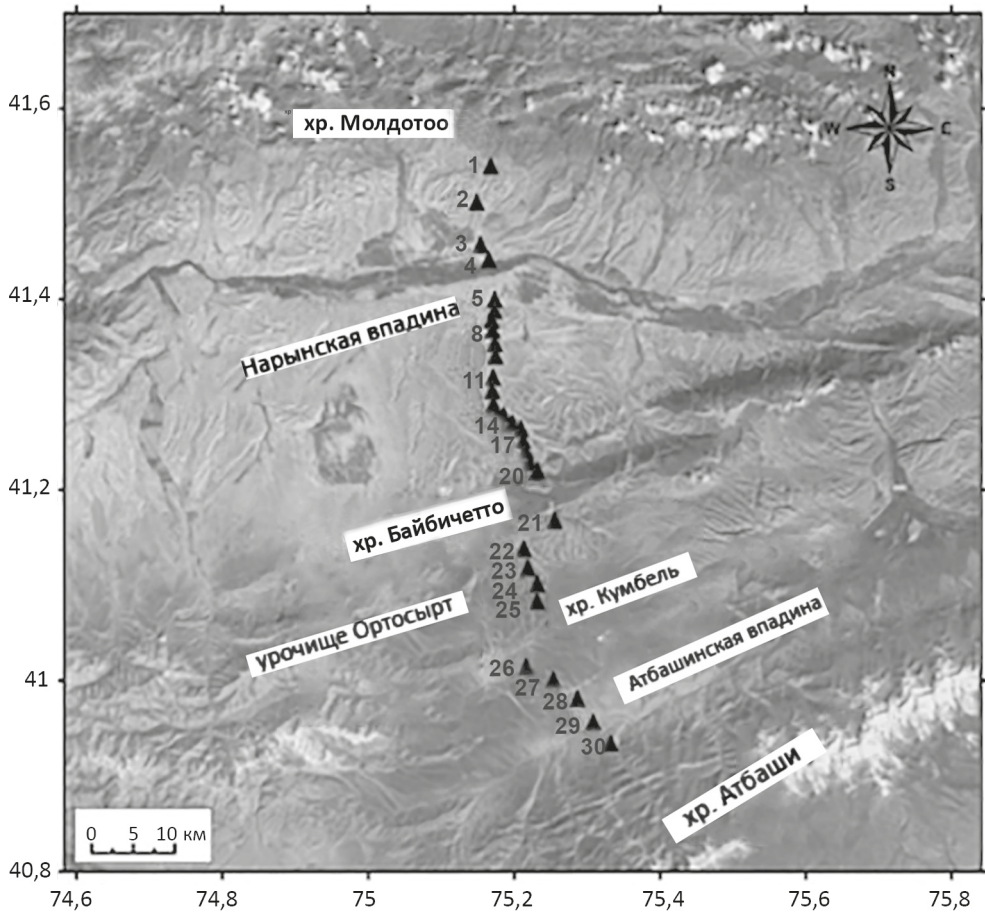


Рис. 8. Расположение профиля Карабук. Цифрами 1–30 обозначены пункты МТ-зондирования

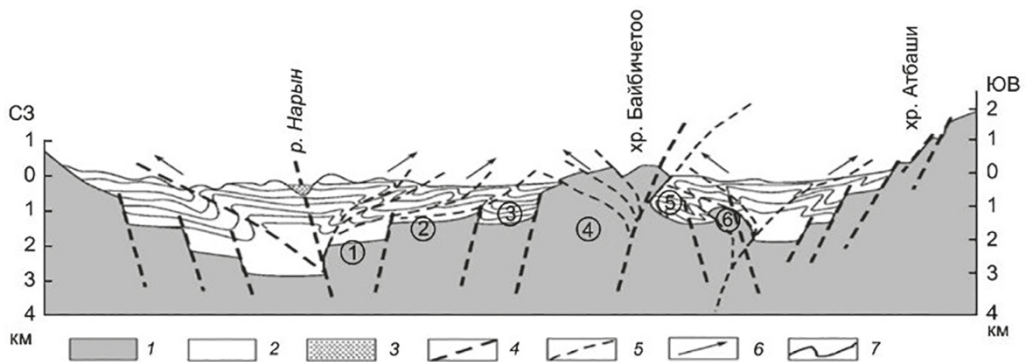


Рис. 9. Упрощенный геологический поперечный разрез системы Нарынская впадина—хребет Байбичетто—Атбашинская впадина (Morozov et al., 2014):

1 — палеозойский фундамент; 2 — кайнозойский чехол; 3 — аллювий р. Нарын; 4 — разломы, секущие породы фундамента; 5 — разломы в чехольном комплексе; 6 — направление перемещений по разломам; 7 — складки в чехольном комплексе; цифры в кружках — сопоставляемые геоэлектрические объекты

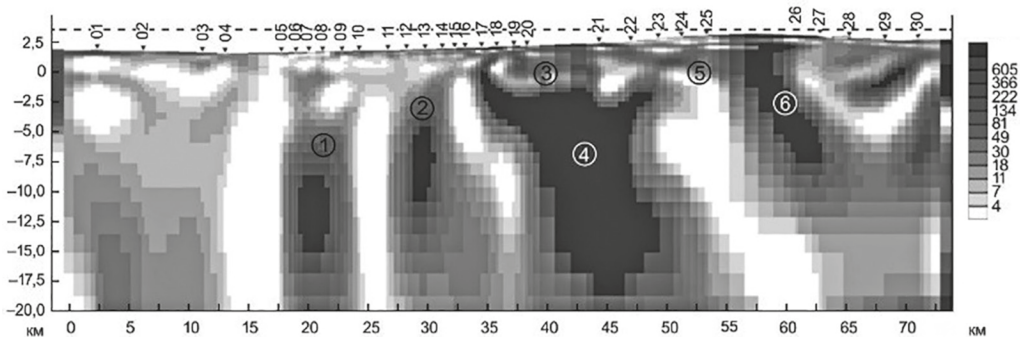


Рис. 10. Двумерная геоэлектрическая модель разреза вдоль МТЗ-профиля Карабук.

Шкала справа — градация удельных электросопротивлений, Ом · м; цифры в кружках — сопоставляемые геоэлектрические объекты

свидетельствует наличие в геоэлектрической модели и проводящей структуры (объект 5), и изолятора (объект 6), предсказанных в глубинном геологическом разрезе (Morozov et al., 2014). Атбашинская впадина повторяет черты Нарынской с пологим южным крылом и крутым северным, оборванным серией разломов. В геоэлектрической модели северная граница с хребтом Байбичетоо представлена наклонной проводящей структурой, простирающейся до глубин 20 км и более. При этом вергентность проводящих (разломных) структур, ограничивающих высокоомный выступ хребта Байбичетоо в геоэлектрической модели, не согласуется с вергентностью соответствующих структур геологического разреза. Однако корреляция проводящих объектов геоэлектрической модели и разломных структур, ограничивающих Атбашинскую впадину с севера и юга, очень высокая.

Аномалии электрической проводимости, представленные в геоэлектрической модели в виде субвертикальных проводящих объектов с простиранием вдоль бортов впадин, могут быть обусловлены зонами динамического влияния разломов и катаклаза гранитов (зоны 2 и 3 на рис. 10). При этом отметим, что область динамического влияния разлома представляет собой окружающее разлом геологическое пространство, в котором проявляются остаточные (пластические или разрывные) следы деформаций, вызванные формированием разлома или подвижками по нему (Шерман и др., 1983). Когда сквозные трещины (токовые каналы) этой области повышенной трещиноватости и пористости заполняются флюидом, она отображается в геоэлектрическом разрезе в виде структуры с пониженным сопротивлением. Для катаклаза типичны растрескивание и грануляция горных пород, что является дополнительным фактором, повышающим проницаемость геосреды и, как следствие, ее возможную флюидонасыщенность и проводимость.

### 2.3. Морфоструктуры локально-регионального масштаба

К данному типу морфоструктур относятся фрагменты тектонических зон, протяженные зоны интенсивных, преимущественно бескорневых складчато-надвиговых, деформаций, обособленные структурно массивы и блоки пород с индивидуальным характером или ориентировкой мезоструктур. В этом масштабе отчетливо проявляется различие характерных структур и стилей деформаций в породах

различного состава, приуроченных и к осадочному чехлу внутригорных впадин, и к их кристаллическому основанию.

Для ритмично построенных пачек кайнозойских отложений характерны складчато-разрывные структурные парагенезы, сформировавшиеся благодаря складчато-блоковым деформациям поверхности палеозойского фундамента или в результате перераспределения масс пород фундамента в крутых бортах впадин. В последнем случае (см. рис. 6 и 7) в чехле внутренних участков впадин формируются бескорневые послонные детачменты, а в прибортовых частях — надвиго-складчатые системы, детально описанные в работах (Bullen et al., 2003; Przhivalgovskii et al., 2018; Пржиялговский и Лаврушина, 2017; Thompson et al., 2001).

В тектонически дезинтегрированных породах кристаллического фундамента (прежде всего в гранитоидах) выявлены структуры, отражающие мобильность и пластичность отдельных объемов пород. Это, например, амплитудные слабо упорядоченные складки поверхности предорогенного пенеплена (Пржиялговский и Лаврушина, 2017), морфологически выраженные изолированные массивы (рис. 11) и разновразмерные протрузии гранитоидов в осадочный чехол, детально описанные в работах (Леонов и др., 2016а; Леонов и др., 2016б). Уменьшение эффективной вязкости «холодных» гранитных массивов обусловлено их постумной тектонической дезинтеграцией (Леонов и др., 2018). Дезинтегрированные породы, имеющие повышенную проницаемость для водных (иногда минерализованных) растворов, подвержены гидратации, коллоидно-химическим и ионно-обменным процессам, повышающим электрическую проводимость, что четко фиксируется в геоэлектрических разрезах вдоль профилей МТЗ (Rybin et al., 2016; Bataleva et al., 2017). Низкоомные области дезинтеграции в фундаменте могут иметь субпластовый характер (рис. 12) или отображать внутреннюю неоднородность крупных массивов, обусловленную квазипластическими деформациями (см. рис. 6 и 7).

#### *2.4. Морфоструктуры мезо- и микромасштабов (уровень обнажений и внутривидный уровень)*

Разномасштабность структурной переработки пород на альпийском этапе тектогенеза наиболее ярко проявляется при изучении систем трещиноватости и деформационных микроструктур в раннепалеозойских гранитах, преобладающих в палеозойском фундаменте Северного Тянь-Шаня. Хотя образование трещин в гранитах обусловлено разнообразными факторами, трудно переоценить значение тектонической дезинтеграции массивов внутри региональных зон активизации (Леонов и др., 2018). Сформировавшиеся в течение альпийского тектогенеза структуры дезинтеграции гранитных массивов мезо- и микромасштабного уровней в полной мере отражают степень вовлеченности разных фрагментов массивов в катаклаз и тектоническое течение. Характерные элементы делимости гранитов, возникающей в ходе этого течения, — блоки линзовидной или овоидной формы, по границам которых отмечаются разнонаправленные рассредоточенные смещения (Леонов и др., 2016а; Леонов и др., 2016б; Пржиялговский и Лаврушина, 2017). Данные блоки не только смещаются относительно друг друга, но также деформируются за счет систем внутренних трещин — субпараллельных слайс-структур, впервые описанных в гранитах Забайкалья и Монголии (Леонов, 2008;

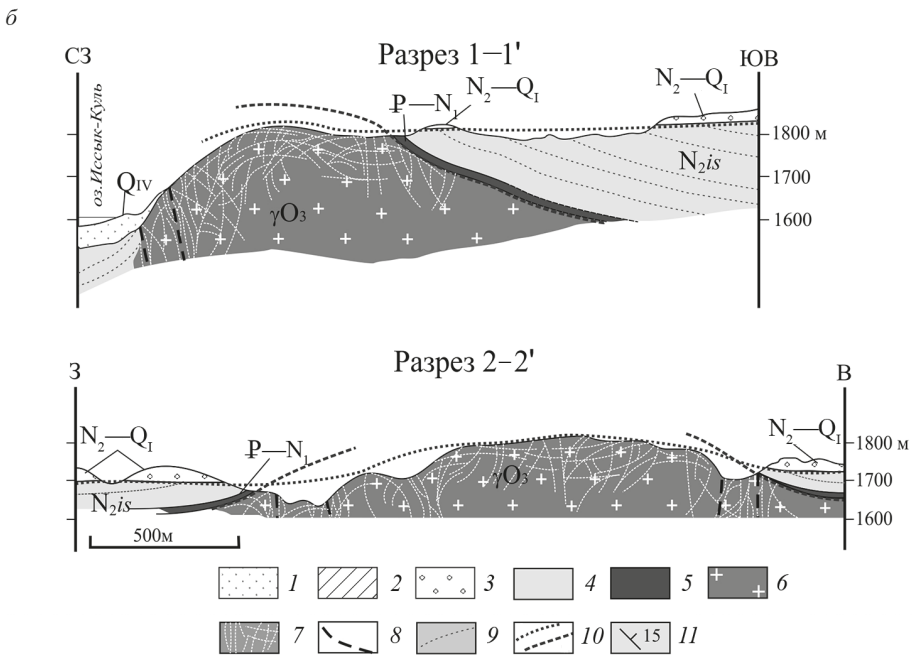
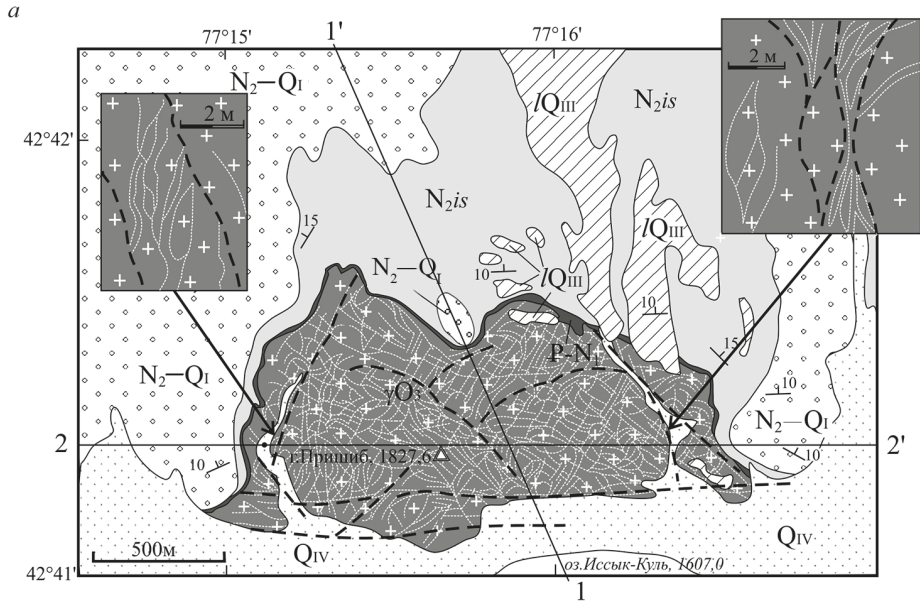


Рис. 11. Геологическая карта (а) и разрезы (б) гранитного массива Пришиб:

1 — современные коллювий и пролювий (Q<sub>IV</sub>); 2 — верхнеплейстоценовые лёссы (IQ<sub>III</sub>); 3 — шарпылдакская свита плиоцена — нижнего плейстоцена (N<sub>2</sub>—Q<sub>I</sub>); 4 — иссыккульская серия плиоцена (N<sub>2is</sub>); 5 — коктурпакская и киргизская серии нерасчлененные (P—N<sub>I</sub>); 6 — позднеордовикские калишпатовые граниты (γO<sub>3</sub>); 7 — трещиноватость в гранитах; 8 — разломы; 9 — слоистость в осадочном чехле; 10 — положение предмиоценовой (верхняя линия) и предпалеоценовой (нижняя линия) денудационных поверхностей; 1-1' и 2-2' — линии разрезов; на врезках — характер структурной делимости гранитов



Пржиялговский и др., 2014), линзовидных и веерных систем трещиноватости, меняющих ориентировку на границах крупных блоков. Установлено, что размеры структур дезинтеграции примерно на полтора порядка меньше размеров пликативных структур кровли массивов. Так, в массивах Пришиб и Кызыл-Чоку, расположенных в бортах Иссык-Кульской впадины, размеры линзовидно-овоидных блоков составляют 2–20 м, а радиус кривизны свода купольной структуры — 400–800 м. В Чункурчакском массиве, расположенном в предгорьях Киргизского хребта, изгибы поверхности пенеплена с радиусом кривизны 400 м и более также обеспечиваются делимостью на блоки размером 5–30 м. Существенно более мелкие (размером 0,5–1,5 м) линзовидные структуры в гранитах урочища Кызыл-Булак на южном берегу оз. Иссык-Куль (рис. 13) определяют инфраструктуру вытянутых вдоль разлома плитообразных протрузивных тел мощностью около 15 м. Аналогичные соотношения установлены для небольшой протрузии гранитов в южном борту Кочкорской впадины.

Деформационные микроструктурные изменения пород в той или иной степени проявлены во всех массивах гранитоидов Тянь-Шаня и охватывают значительные их фрагменты. Характерными формами тектонической перестройки пород являются катаклаз и брекчирование на минеральном уровне, пластическая деформация кристаллов, динамическая рекристаллизация, микрокливаж и др. Структурная перестройка сопровождается изменением минерального состава исходных пород, замещением полевых шпатов гипергенными минералами, насыщением пород гидротермальными прожилками. Интенсивность и характер структурной переработки зависят от мезо- и макроструктур. Слабоизмененные граниты с гипидиоморфнозернистой структурой сохраняются в центральных частях блоков. В зонах разломов и интенсивной трещиноватости, а также в протрузивных телах наблюдаются катаклазиты со следами многоактного дробления и отмечены участки пород с зонами рекристаллизации, а в зонах смещений — хаотические микробрекчии и ультрамилониты,

Изменения на микро- и мезоуровне приводят к возникновению гранулярной блоковой структуры породных масс, что реализует их повышенную объемную подвижность и относительную автономность движения согласно законам механики гранулированных сред. Структурная перестройка сопровождается изменением плотности, пористости, флюидопроницаемости пород (и, как следствие, электрической проводимости). Эти изменения фиксируются разными геофизическими методами, что было подчеркнуто выше (см. рис. 12).

## **Выводы**

Таким образом, на основе нового геолого-геофизического материала, полученного при изучении приповерхностных морфоструктурных ансамблей и соответствующих им глубинных структурно-вещественных неоднородностей, подтверждены ранее известные и установлены новые закономерности строения и геодинамики Памиро-Тянь-Шаньского сегмента Центральной Азии, среди которых следующие:

- 1) структурная дисгармония на главных поверхностях раздела коры и литосферы (чехол/фундамент, внутрикоровые разделы, поверхность Мохоравичича);



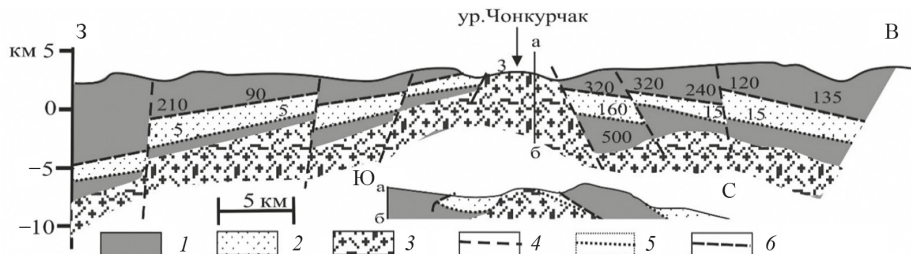


Рис. 12. Геологическая интерпретация геоэлектрического широтного разреза и поперечный геологический профиль вдоль плоскости а—б (зона сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта):

1 — высокоомный гетерогенный фундамент; 2 и 3 — соответственно верхний (палеоген—неоген) и средний (гранитный фундамент) слои пород повышенной электрической проводимости; 4 — предполагаемые разломы; 5 и 6 — соответственно подошва (стратиграфический контакт) и кровля (тектонический контакт) верхнего низкоомного горизонта; числами показано удельное сопротивление, Ом · м

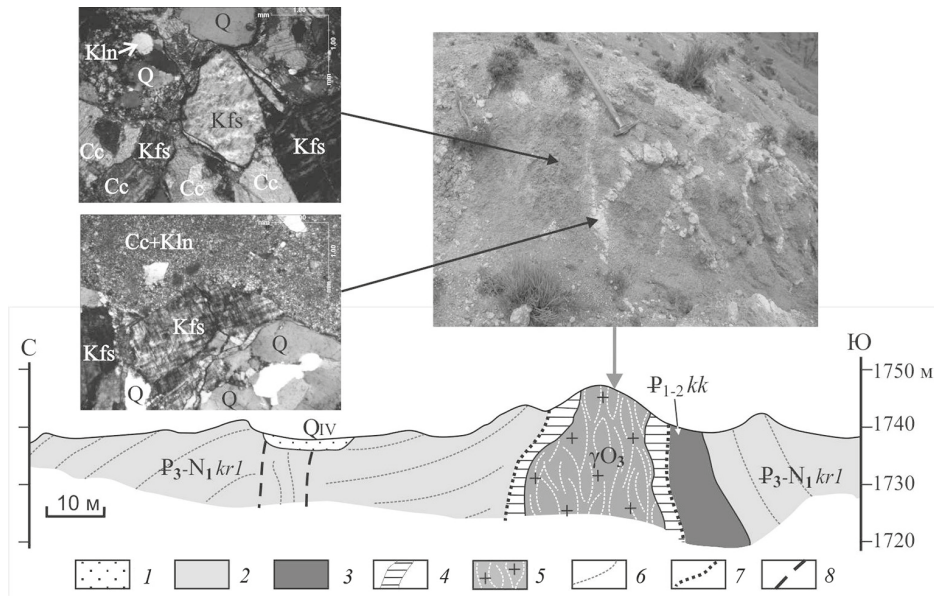


Рис. 13. Геологический разрез через протрузию Кызыл-Булак в южном борту Иссык-Кульской впадины (западнее с. Каджи-Сай):

1 — четвертичный аллювий ( $Q_{IV}$ ); 2 — нижнекиргизская свита олигоцена — миоцена ( $P_3-N_1kr1$ ); 3 — кокотурпакская серия палеоцена — эоцена ( $P_{1-2}kk$ ); 4 — зона бесструктурных карбонатно-песчано-глинистых пород (тектонитов); 5 — тектонически дезинтегрированная кора выветривания; 6 — слоистость; 7 — протрузивный контакт; 8 — разломы; на врезках — деформационные структуры в выветренных гранитах в обнажении и в шлифах (минералы в шлифах: Kfs — калиевый полевой шпат, Cc — кальцит, Kln — каолинит, Q — кварц)

- 2) многофакторность формирования морфоструктурного облика Тянь-Шаня и Памира;
- 3) наличие характерных структурных ансамблей, соответствующих различным типам коры и сегментам новейшего орогена;
- 4) парагенетическое единство разномасштабных тектонических структур, выявляемых геологическими и геофизическими методами в пределах крупных тектонически однородных сегментов коры.

## Литература

- Аптикаева, О. И., Копничев, Ю. Ф., Шевченко, В. И., 1994. Строение коры и верхней мантии и тектогенез территории Гармского полигона (Таджикистан). *Физика Земли* 7, 53–64.
- Леонов, М. Г., 2008. Тектоника консолидированной коры. Наука, Москва.
- Леонов, М. Г., Пржиялговский, Е. С., Лаврушина, Е. В., 2018. Граниты. Постмагматическая тектоника и углеводородный потенциал. Геос, Москва.
- Леонов, М. Г., Пржиялговский, Е. С., Лаврушина, Е. В., Рыбин, А. К., 2016а. Постмагматическая тектоника гранитов и морфоструктура Северного Тянь-Шаня. *Литосфера* 6, 5–29.
- Леонов, М. Г., Пржиялговский, Е. С., Полещук, А. В., Лаврушина, Е. В., Рыбин, А. К., 2016б. Альпийская тектоника гранитов фундамента Иссык-Кульской впадины, Северный Тянь-Шань. *Геотектоника* 4, 22–47. URL: <https://doi.org/10.7868/S0016853X16040068>.
- Леонов, М. Г., Рыбин, А. К., Баталев, В. Ю., Баталева, Е. А., Матюков, В. Е., Щелочков, Г. Г., 2017. Гиссаро-Алай и Памир. Сравнительно-тектонический анализ и геодинамика. Геос, Москва.
- Лукк, А. А., Шевченко В. И., 2004. Роль локальных процессов тектогенеза в деформировании слоистых толщ Таджикской депрессии. *Физика Земли* 11, 5–25.
- Матюков, В. Е., 2013. Глубинное строение зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня по данным магнитотеллурических зондирований. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32255350> (дата обращения: 28.11.2018).
- Пржиялговский, Е. С., Лаврушина, Е. В., 2017. Складчатые деформации кровли палеозойского фундамента Чункурчакского прогиба, Киргизский хребет. *Геотектоника* 3, 31–50. URL: <https://doi.org/10.7868/S0016853X17030092>.
- Пржиялговский, Е. С., Леонов, М. Г., Лаврушина, Е. В., 2014. Гранитные протрузии в структуре зон внутриплитной активизации (Южная Монголия). *Геотектоника* 3, 50–77. URL: <https://doi.org/10.7868/S0016853X14030059>.
- Рыбин, А. К., 2011. Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических зондирований. *Научный мир*, Москва.
- Рыбин, А. К., Матюков, В. Е., Баталев, В. Ю., Баталева, Е. А., 2015. Глубинная геоэлектрическая структура и сейсмичность Памиро-Алайской зоны, в: *Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов*. Научная станция РАН, Бишкек, 208–217.
- Руженцев, С. В., 1971. Особенности структуры и механизм образования сорванных покровов. Наука, Москва.
- Сусин, О. А., Верхотуров, В. Е., 1984. Состояние изученности и некоторые вопросы исследований глубинного строения Памира, в: *Геология и геофизика Таджикистана*. Душанбе, Дониш, 72–84.
- Шерман, С. И., Борняков, С. А., Буддо, В. Ю., 1983. Области динамического влияния разломов. Наука, Новосибирск.
- Batalev, E. A., Batalev, V. Y., Matyukov, V. E., Rybin, A. K., Przhivalgovskii, E. S., Lavrushina, E. V., Leonov, M. G., 2017. New data on the deep structure of the south Kochkor zone of concentrated deformation. *Doklady Earth Sciences* 475(2), 930–934. URL: <https://doi.org/10.1134/S1028334X1708013X>.
- Bullen, M. E., Burbank, D. W., Garver, J. I., 2003. Building the northern Tien Shan: Integrated thermal, structural, and topographic constraints. *The Journal of Geology* 111, 149–165. URL: <https://doi.org/10.1086/345840>.
- Duchkov, A. D., Shvartsman, Y. G., Sokolova, L. S., 2001. Deep heat flow in the Tien Shan: advances and drawbacks. *Geologiya i Geofizika* 42(10), 1516–1531.

- Morozov, Yu. A., Leonov, M. G., Alekseev, D. V., 2014. Pull-Apart Formation Mechanism of Cenozoic Basins in the Tien Shan and Their Transpressional Evolution: Structural and Experimental Evidence. *Geotectonics* 48(1), 24–53. URL: <https://doi.org/10.1134/S0016852114010051>.
- Park, S. K., Thompson, S. C., Rybin, A. K., Batalev, V. Yu., Bielinski, R., 2003. Structural constraints in neotectonic studies of thrust faults from the magnetotelluric method, Kochkor Basin, Kyrgyz Republic. *Tectonics* 22(2), 1–13. URL: <https://doi.org/10.1029/2001tc001318>.
- Przhiyalgovskii, E. S., Lavrushina, E. V., Batalev, V. Yu., Bataleva, E. A., Leonov, M. G., Rybin, A. K., 2018. Structure of the basement surface and sediments in the Kochkor basin (Tien Shan): geological and geophysical evidence. *Russian Geology and Geophysics* 59(4), 335–350. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.09.003>.
- Rybin, A. K., Batalev, V. Y., Bataleva, E. A., Bragin, V. D., Schelochkov, G. G., Leonov, M. G., Przhiyalgovskii, E. S., Morozov, Y. A., 2016. Nature of electric conductive layers of the upper crust and infrastructure of granites of the Central Tien Shan. *Doklady Earth Sciences* 470(1), 968–971. URL: <https://doi.org/10.1134/S1028334X16090142>.
- Rybin, A. K., Bataleva, E. A., Morozov, Y. A., Leonov, M. G., Batalev, V. Y., Matyukov, V. E., Zabinyakova, O. B., Nelin, V. O., 2018. Specific features in the deep structure of the Naryn Basin — Baibichetoo Ridge — Atbashi Basin System: evidence from the complex of geological and geophysical data. *Doklady Earth Sciences* 479(2), 499–502. URL: <https://doi.org/10.1134/S1028334X18040165>.
- Sass P., Ritter, O., Ratschbacher, L., Tjypel, J., Matiukov, V. E., Rybin, A. K., Batalev, V. Yu., 2014. Resistivity structure underneath the Pamir and Southern Tien Shan. *Geophysical Journal International* 198(1), 564–579. URL: <https://doi.org/10.1093/gji/ggu146>.
- Schneider, F., Yuan, X., Schurr, B., Mechie, J., Sippl, C., Haberland, C., Minaev, V., Oimahmadov, I., Gadoev, M., Radjabov, N., Abdybaev, U., Orunbaev, S., Negmatullaev, S., 2013. Seismic imaging of subducting continental lower crust beneath the Pamir. *Earth and Planetary Science Letters* 375(1), 101–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.015>.
- Sippl, C., Schurr, B., Yuan, X., Mechie, J., Schneider, F. M., Gadoev, M., Orunbaev, S., Oimahmadov, I., Haberland, C., Abdybaev, U., 2013. Geometry of the Pamir — Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118(4), 1438–1457. URL: <https://doi.org/10.1002/jgrb.50128>.
- 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107(7), 1–32. URL: <https://doi.org/10.1029/2001jb000596>.

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2018 г.  
Статья рекомендована в печать 15 октября 2018 г.

#### Контактная информация:

*Рыбин Анатолий Кузьмич* — [rybin@gdirc.ru](mailto:rybin@gdirc.ru); [ns\\_ran@mail.ru](mailto:ns_ran@mail.ru)  
*Леонов Михаил Георгиевич* — [mgleonov@yandex.ru](mailto:mgleonov@yandex.ru)  
*Прзьялговский Евгений Станиславович* — [prz4@yandex.ru](mailto:prz4@yandex.ru)  
*Баталева Елена Анатольевна* — [bataleva@gdirc.ru](mailto:bataleva@gdirc.ru)  
*Матюков Виталий Евгеньевич* — [vitaliy@gdirc.ru](mailto:vitaliy@gdirc.ru)  
*Лаврушина Екатерина Васильевна* — [catherinelav@yandex.ru](mailto:catherinelav@yandex.ru)  
*Забинякова Ольга Борисовна* — [zabinyakova@gdirc.ru](mailto:zabinyakova@gdirc.ru)  
*Щелочков Геннадий Григорьевич* — [tgg@ginras.ru](mailto:tgg@ginras.ru)

## Upper crust structural and morphological ensembles of the Pamir-Tien Shan segment of Central Asia and their reflection in geophysical fields

A. K. Rybin<sup>1</sup>, M. G. Leonov<sup>2</sup>, E. S. Przhivalgovskii<sup>2</sup>, V. Yu. Batalev<sup>1†</sup>, E. A. Bataleva<sup>1</sup>, V. E. Matyukov<sup>1</sup>, E. V. Lavrushina<sup>2</sup>, O. B. Zabinyakova<sup>1</sup>, G. G. Schelochkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Station of the Russian Academy of Sciences,  
Bishkek-city, Bishkek-49, 720049, Kyrgyzstan

<sup>2</sup> Geological Institute of the Russian Academy of Sciences,  
7, Pyzhevsky per., Moscow, 119017, Russian Federation

**For citation:** Rybin A. K., Leonov M. G., Przhivalgovskii E. S., Batalev V. Yu., Bataleva E. A., Matyukov V. E., Lavrushina E. V., Zabinyakova O. B., Schelochkov G. G. Upper crust structural and morphological ensembles of the Pamir-Tien Shan segment of Central Asia and their reflection in geophysical fields. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, issue 4, pp. 478–501. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.405> (In Russian)

Structural-morphological ensembles of different ranks for Pamir — Tien Shan segment of Central Asia and their possible correlation with the data of remote geophysical investigations are considered in the paper. Results of such correlation analysis are discussed. A bright example of the morphostructures of cross-regional scale on the territory of the Eurasian continent are the mountain systems of the Pamirs and the Tien Shan, historically, structurally and geologically two different provinces which differ in configuration, internal structure and features of evolution and orogenesis. The paper presents the results of a comprehensive study of the deep structure of the lithosphere of the southern Tien Shan and the Pamirs along the TIPAGE profile. The analysis of the geophysical inhomogeneities distribution of the profile section shows that the deep structure of the southern Tien Shan differs significantly from that of the Pamirs. The orhostructures of the regional scale and their reflection in the detailed magnetotelluric sounding data are considered on the basis of the results of geological and geophysical study of the Tien Shan tectonic zones: Kochkor Basin and Naryn Basin-Baibichetoo-Atbashi Basin. The study reveals a good correlation between the surface structure determined by geomorphological and structural methods and the deep geoelectric section, built on the high-resolution magnetotelluric sounding data. The paper also considers examples of morphostructures of local-regional scale, meso- and micro-scales, identified by the authors of the paper within the study of the structural features of tectonic blocks and rock mass of the Northern Tien Shan. All examples of surface and deep structures correlation presented in the paper demonstrate the paragenetic uniformity of different-scale tectonic structures revealed by geological and geophysical methods within large and tectonically homogeneous segments of the Tien Shan and Pamir crust.

*Keywords:* upper crust structural and morphological ensembles, deep magnetotelluric sounding, geophysical model, seismicity, geodynamics, Tien Shan, Pamir.

### References

- Aptikaeva, O. I., Kopnichev, Yu. F., Shevchenko, V. I., 1994. The structure of the crust and upper mantle and tectogenesis of the territory of the Garm polygon (Tajikistan). *Physics of the Solid Earth* 7, 53–64.
- Bataleva, E. A., Batalev, V. Y., Matyukov, V. E., Rybin, A. K., Przhivalgovskii, E. S., Lavrushina, E. V., Leonov, M. G., 2017. New data on the deep structure of the south Kochkor zone of concentrated deformation. *Doklady Earth Sciences* 475(2), 930–934. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X1708013X>.
- Bullen, M. E., Burbank, D. W., Garver, J. I., 2003. Building the northern Tien Shan: Integrated thermal, structural, and topographic constraints. *The Journal of Geology* 111, 149–165. Available at: <https://doi.org/10.1086/345840>

- Duchkov, A. D., Shvartsman, Y. G., Sokolova, L. S., 2001. Deep heat flow in the Tien Shan: advances and drawbacks. *Geologiya i Geofizika* 42(10), 1516–1531.
- Leonov, M. G., 2008. Tectonics of the consolidated crust. Science, Moscow.
- Leonov, M. G., Przyjalkowski, E. S., Lavrushina, E. V., 2018. Granites. Postmagmatic tectonics and hydrocarbon potential. Geos, Moscow.
- Leonov, M. G., Przhivalgovskii, E. S., Lavrushina, E. V., Rybin, A. K., 2016. Postmagmatic tectonics of granites and morphostructure the Northern Tien Shan. *Lithosphere* 6, 5–29.
- Leonov, M. G., Przhivalgovskiy, E. S., Lavrushina, E. V., Poleshchuk, A. V., Rybin, A. K., 2016. Alpine tectonics of granites in basement of Ysyk-Köl Basin, northern Tien Shan. *Geotectonics* 50 (4), 366–388. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0016852116040063>.
- Leonov, M. G., Rybin, A. K., Batalev, V. E., Bataleva, E. A., Matyukov, V. E., Shchelochkov, G. G., 2017. Gissaro-Alai and Pamir. Comparative tectonic analysis and geodynamics. Geos, Moscow.
- Lukk, A. A., Shevchenko, V. I., 2004. Implications of local tectogenesis for the deformation of layered sequences in the Tajik depression. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* 40(11), 897–916.
- Matyukov, V. E., 2013. The deep structure of the joint zone of the Pamirs and Tien Shan according to magnetotelluric sounding. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32255350> (accessed: 28.11.2018).
- Morozov, Yu. A., Leonov, M. G., Alekseev, D. V., 2014. Pull-Apart Formation Mechanism of Cenozoic Basins in the Tien Shan and Their Transpressional Evolution: Structural and Experimental Evidence. *Geotectonics* 48(1), 24–53. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0016852114010051>.
- Park, S. K., Thompson, S. C., Rybin, A. K., Batalev, V. Yu., Bielinski, R., 2003. Structural constraints in neotectonic studies of thrust faults from the magnetotelluric method, Kochkor Basin, Kyrgyz Republic. *Tectonics* 22(2), 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1029/2001tc001318>.
- Przyjalkowski, E. S., Lavrushina, E. V., 2017. Folded deformation of the roof of the Paleozoic Foundation Chunkurchak deflection, Kyrgyz ridge. *Geotectonics* 51(4), 31–50. Available at: <https://doi.org/10.1134/s0016852117030098>.
- Przhivalgovskii, E. S., Lavrushina, E. V., Batalev, V. Yu., Bataleva, E. A., Leonov, M. G., Rybin, A. K., 2018. Structure of the basement surface and sediments in the Kochkor basin (Tien Shan): geological and geophysical evidence. *Russian Geology and Geophysics* 59(4), 335–350. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.09.003>.
- Przyjalkowski, E. S., Leonov, M. G., Lavrushina, E. V., 2014. Granite protrusions in the structure of intraplate activation zones (South Mongolia). *Geotectonics* 48(3), 50–77. Available at: <https://doi.org/10.1134/s0016852114030054>.
- Ruzhentsev, S. V., 1971. Features of the structure and mechanism of formation of torn covers. Science, Moscow.
- Rybin, A. K., 2011. Deep structure and modern geodynamics of the Central Tien Shan according to the results of magnetotelluric sounding. Scientific world, Moscow.
- Rybin, A. K., Batalev, V. Y., Bataleva, E. A., Bragin, V. D., Schelochkov, G. G., Leonov, M. G., Przhivalgovskii, E. S., Morozov, Y. A., 2016. Nature of electric conductive layers of the upper crust and infrastructure of granites of the Central Tien Shan. *Doklady Earth Sciences* 470(1), 968–971. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X16090142>.
- Rybin, A. K., Bataleva, E. A., Morozov, Y. A., Leonov, M. G., Batalev, V. Y., Matyukov, V. E., Zabinyakova, O. B., Nelin, V. O., 2018. Specific features in the deep structure of the Naryn Basin–Baibichetoo Ridge–Atbashi Basin System: evidence from the complex of geological and geophysical data. *Doklady Earth Sciences* 479(2), 499–502. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X18040165>.
- Rybin, A. K., Matyukov, V. E., Batalev, V. Y., Bataleva, E. A., 2015. Deep geoelectric structure of the Pamir-Alai zone, in: Problems of geodynamics and geocology of intracontinental orogens. Scientific station of RAS, Bishkek, 208–2017.
- Sass P., Ritter, O., Ratschbacher, L., Tjypel, J., Matiukov, V. E., Rybin, A. K., Batalev, V. Yu., 2014. Resistivity structure underneath the Pamir and Southern Tian Shan. *Geophysical Journal International* 198(1), 564–579. Available at: <https://doi.org/10.1093/gji/ggu146>.
- Schneider, F., Yuan, X., Schurr, B., Mechie, J., Sippl, C., Haberland, C., Minaev, V., Oimahmadov, I., Gadoev, M., Radjabov, N., Abdybachaev, U., Orunbaev, S., Negmatullaev, S., 2013. Seismic imaging of subducting continental lower crust beneath the Pamir. *Earth and Planetary Science Letters* 375(1), 101–112. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.015>.
- Sherman, S. I., Borniakov, S. A., Buddha, V. Y., 1983. Areas of dynamic influence of faults. Science, Novosibirsk.



- Sippl, C., Schurr, B., Yuan, X., Mechie, J., Schneider, F.M., Gadoev, M., Orunbaev, S., Oimahmadov, I., Haberland, C., Abdybachaev, U., 2013. Geometry of the Pamir — Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118(4), 1438–1457. Available at: <https://doi.org/10.1002/jgrb.50128>.
- Susin, O. A., Verkhoturov, V. E., 1984. The state of knowledge and some questions of research of the deep structure of the Pamirs, in: *Geology and Geophysics of Tajikistan*. Donish, Dushanbe, 72–84.
- 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107(7), 1–32. Available at: <https://doi.org/10.1029/2001jb000596>

Received: September 27, 2018

Accepted: October 15, 2018

#### Author's information:

*Anatoly K. Rybin* — [rybin@gdirc.ru](mailto:rybin@gdirc.ru); [ns\\_ran@mail.ru](mailto:ns_ran@mail.ru)

*Mikhail G. Leonov* — [mgleonov@yandex.ru](mailto:mgleonov@yandex.ru)

*Evgeny S. Przhiyalgovskii* — [prz4@yandex.ru](mailto:prz4@yandex.ru)

*Elena A. Bataleva* — [bataleva@gdirc.ru](mailto:bataleva@gdirc.ru)

*Vitaly E. Matyukov* — [vitaliy@gdirc.ru](mailto:vitaliy@gdirc.ru)

*Ekaterina V. Lavrushina* — [catherinelav@yandex.ru](mailto:catherinelav@yandex.ru)

*Olga B. Zabinyakova* — [zabinyakova@gdirc.ru](mailto:zabinyakova@gdirc.ru)

*Gennady G. Schelochkov* — [tgg@ginras.ru](mailto:tgg@ginras.ru)