

# МОНИТОРИНГОВЫЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНЫ ИССЫК-АТИНСКОГО РАЗЛОМА (СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

А. К. Рыбин<sup>1</sup> , Е. А. Баталева<sup>1</sup> , О. Б. Забиякова<sup>1</sup> , К. С. Непейна<sup>\*1</sup> 

<sup>1</sup> Научная станция РАН в г. Бишкеке, г. Бишкек, Киргизия

\* **Контакт:** Ксения Сергеевна Непейна, neks@gdir.ru

В 2023 году выполнены мониторинговые геофизические исследования методом электротомографии (ЭТ) вдоль трёх профилей, секущих в поперечном направлении зону простираения Иссyk-Атинского разлома. Проведено детальное изучение наблюдаемых вариаций кажущегося электросопротивления, которые характеризуют изменение электрических свойств верхней части разреза земной коры с 40-минутной дискретизацией во времени. С помощью анализа разностных псевдоразрезов кажущегося сопротивления, построенных по результатам ЭТ-мониторинга, для всех трех профилей мониторинга определен наиболее информативный интервал кажущихся глубин с точки зрения геоэлектрической активности. Соответственно, для кажущейся глубины 24 м на каждом профиле мониторинга сделана оценка геодинамической активности этих участков Иссyk-Атинского разлома на основе анализа величины двух параметров: амплитуды вариаций кажущегося сопротивления и коэффициента корреляции вариаций электросопротивления с лунно-солнечными твердыми приливами. Высокие значения этих параметров, по нашему мнению, определяют местоположение современных активных зон разлома.

**Ключевые слова:** Северный Тянь-Шань, Иссyk-Атинский разлом, геодинамическая активность, электрический мониторинг, электротомография

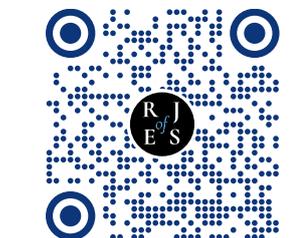
**Цитирование:** Рыбин, А. К., Баталева Е. А., Забиякова О. Б., Непейна К. С.

Мониторинговые электротомографические исследования зоны Иссyk-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Russian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Т. 23. — ES4012. — DOI: 10.2205/2023es000881 — EDN: XWZYVR

## Введение

Основной активной разломной структурой Северного Тянь-Шаня, разделяющей предгорья Киргизского хребта и Чуйскую впадину, является Иссyk-Атинский разлом. На сегодняшний день установлено, что на дневной поверхности этот разлом проявляется фрагментарно и состоит из нескольких сегментов, часть из которых является скрытыми. Изучение скрытых участков разлома возможно геофизическими методами, наиболее эффективными из которых являются электромагнитные [Рыбин и др., 2022]. В настоящей работе впервые рассматриваются результаты малоглубинного электромагнитного мониторинга, выполненного для различных сегментов разломной структуры. Движение и взаимодействие литосферных блоков, залегающих в зоне разлома, определяют его структуру и современное геодинамическое состояние. Поэтому актуальными научными задачами геофизических исследований активных геологических разломов являются как изучение детальной блочной геоэлектрической структуры земной коры в зоне влияния Иссyk-Атинского разлома, так и геофизическая характеристика его геодинамической активности на основе анализа вариаций электромагнитных параметров геосреды [Баталева и др., 2014; Bataleva, 2019; 2020].

В 2022 году в зоне Иссyk-Атинского разлома были выполнены электроразведочные исследования комплексом электромагнитных методов: высокочастотной модификацией



<https://elibrary.ru/XWZYVR>

Получено: 2 ноября 2023 г.

Принято: 20 ноября 2023 г.

Опубликовано: 30 ноября 2023 г.



© 2023. Коллектив авторов.

метода МТЗ – аудио-магнитотеллурического зондирования (АМТЗ), предполагающего регистрацию электромагнитного поля в диапазоне частот от 10 кГц до первых Гц, и малоглубинной электротомографии [Балков и др., 2012; Зарипов, 2014]. В результате установлено геоэлектрическое строение верхней части геологического разреза отдельных сегментов разлома. В построенных геоэлектрических моделях зона Иссык-Атинского разлома проявилась в градиентных областях и в отдельных блоках низкого сопротивления. Низкое сопротивление в зоне динамического влияния разломной структуры обусловлено высокой трещиноватостью и обводненностью пород в зоне разрывного нарушения [Рыбин и др., 2023; Rybin et al., 2023].

Основной целью настоящей работы является рассмотрение результатов обработки и анализа полевых материалов электрического мониторинга, которые были получены в 2023 году с помощью метода электротомографии, а также возможная оценка геодинамической активности отдельных участков Иссык-Атинского разлома на основе результатов геоэлектрического мониторинга.

### Методика мониторинговых электротомографических наблюдений

Мониторинговые электротомографические измерения были проведены в 2023 году по трем профилям, секущим в поперечном направлении зону простираения Иссык-Атинского разлома на различных ее сегментах (рис. 1). Методика мониторинговых ЭТ-исследований заключалась в повторном выполнении профиля наблюдений методами электротомографии и вызванной поляризации в течение нескольких суток с помощью многоэлектродной станции «Скала-48» (отечественная аппаратура, разработанная в ООО «Конструкторское Бюро Электротометрии»). При этом была выбрана 4-электродная установка Шлюмберже, которая, по сравнению с другими установками, является наиболее эффективной на больших глубинах с качественным выделением вертикальных и горизонтальных границ [Loke, 2009]. Результаты измерений сохранялись в формате \*.d2d. Затем эти данные считывались и переносились на компьютер оператора-геофизика для последующей обработки.

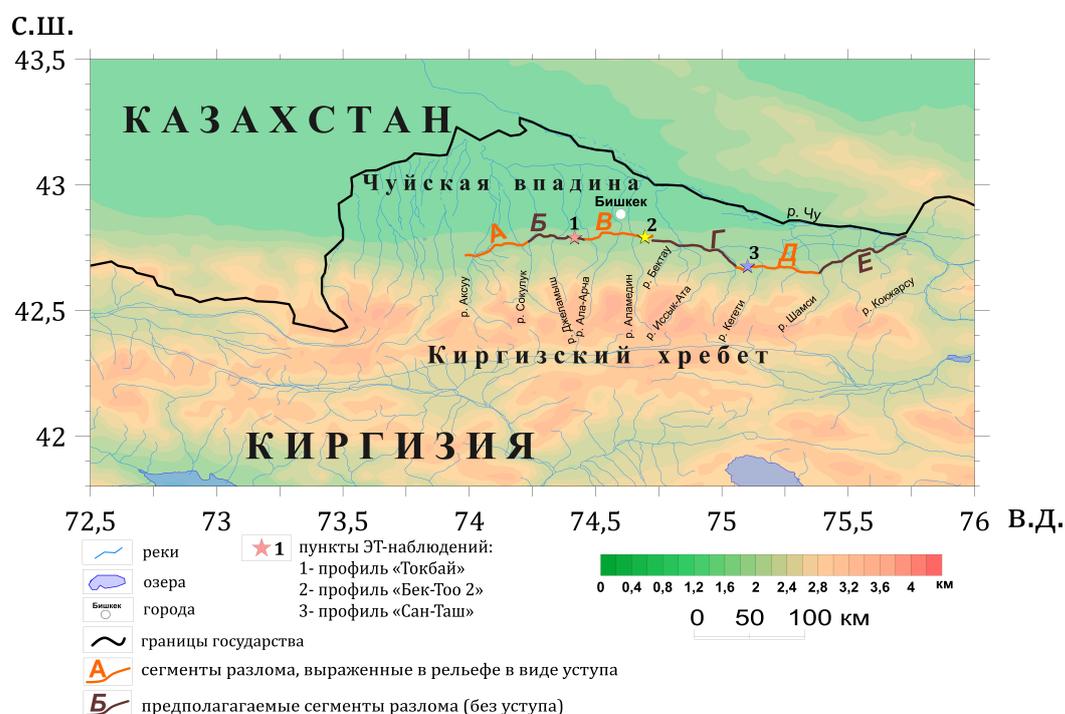


Рис. 1. Карта-схема региона исследований с расположением мониторинговых ЭТ-профилей. Сегментация Иссык-Атинского разлома по [Абдрахматов и Джумабаева, 2014].

Работа станции «Скала-48» производилась с помощью косы (двух многоэлектродных кабелей длиной по 120 м); общее количество электродов при развертывании косы составляло 48, расстановка электродов осуществлялась с шагом 5 м, максимальный разнос питающих электродов – 235 м, а минимальный – 5 м. Полный единичный цикл измерений для всего профиля укладывался в 40 минут. Соответственно, собранный массив таких профильных измерений с дискретностью 40 минут в течение 2–3 суток определял информационную базу ЭТ-мониторинга для трех поперечных сечений различных сегментов зоны простирания Иссык-Атинского разлома: профилей «Сан-Таш», «Бек-Тоо 2» и «Токбай».

Первичная обработка полевых ЭТ-данных осуществлялась с помощью программы *SiBER Tools*, которая входит в штатный комплект аппаратуры «Скала-48» [«Скала-48», 2019]. Первичная обработка является важной частью всей технологии геофизических работ и заключается в просмотре, анализе и редактировании полевых данных оператором-геофизиком. В результате обработки исключаются измерения-выбросы, которые могут внести искажения в получаемые результаты инверсии. Рассмотрим процедуру обработки таких выбросов на примере ЭТ-данных профиля «Сан-Таш».

Программа *SiBER Tools* осуществляет вывод графического отображения всех кривых зондирования, полученных на профиле электротомографии (рис. 2а). В этом множестве кривых обычно присутствует один или несколько трендов, поэтому измерения, не соответствующие этой тенденции, считаются бракованными и удаляются. На рис. 2а приведен пример данных с общим (одним) трендом, а точки, выбивающиеся из этого тренда и подлежащие удалению, выделены красным овалом.

Другим полезным режимом в программе *SiBER Tools* является режим отображения всех профильных кривых (рис. 2б), на которых значения сопротивлений по уровням чаще всего изменяются плавно, а соседние уровни имеют схожее поведение графиков кажущегося сопротивления. Точки (значения измерений), не удовлетворяющие этим требованиям и подлежащие удалению, также выделены красными овалами.

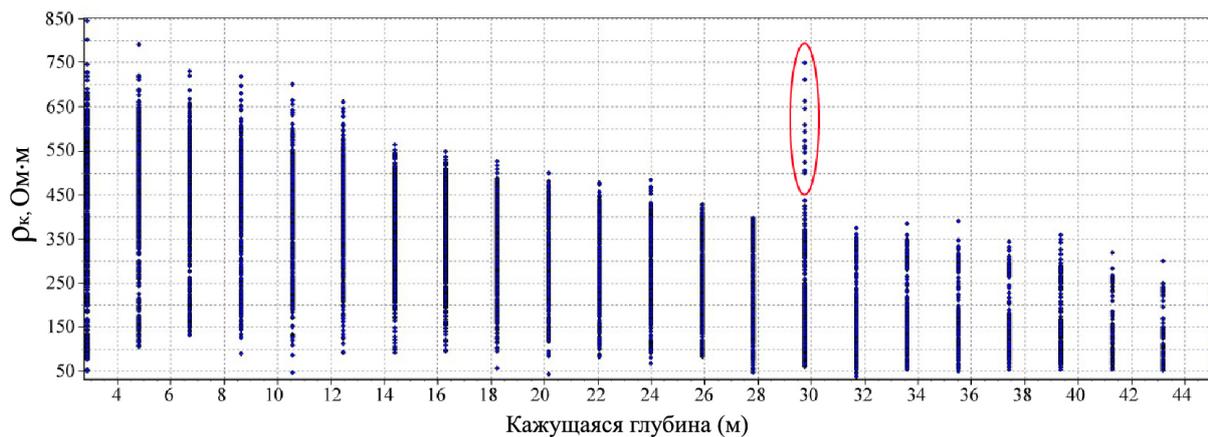
Помимо ручной отбраковки в программе предусмотрена и автоматическая фильтрация с помощью задания предельных значений для отдельных параметров, таких как полоса пропускания фильтра, входящее напряжение, подаваемый ток, значения удельного электрического сопротивления и т.д.

Далее, после удаления бракованных точек, осуществляется экспорт результатов первичной обработки в формат *dat*-файла, которые в дальнейшем формируют информационную базу проведения анализа временной динамики кривых кажущегося сопротивления профиля ЭТ-наблюдений для фиксированного набора значений разности/кажущейся глубины.

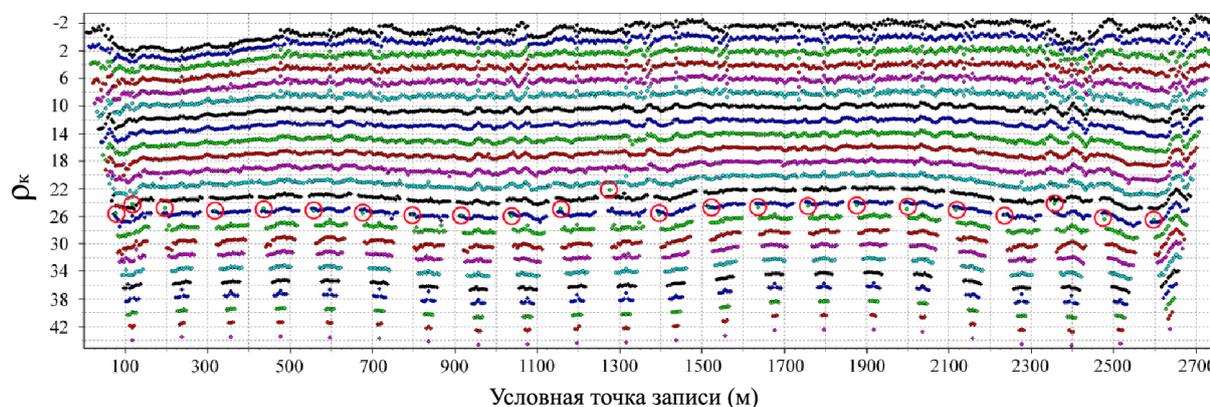
Отдельно отметим, что на первом этапе мониторинговых ЭТ-исследований активных разломов Тянь-Шаня (2023 г.) выполнен анализ результатов электрического мониторинга только на уровне кривых кажущегося сопротивления, что, собственно, и отражено в данной работе. Дальнейшее развитие мониторинговых ЭТ-исследований, несомненно, будет связано с инверсией полевых данных, построением соответствующих геоэлектрических моделей и анализом поведения профильных геоэлектрических разрезов во времени.

### Электротомография по профилям мониторинга

Рассмотрим подробнее результаты мониторинговых электротомографических наблюдений на профилях «Сан-Таш», «Бек-Тоо 2» и «Токбай», расположенных в разных сегментах Иссык-Атинского разлома (рис. 1, рис. 3). В результате повторных электротомографических измерений, выполненных станцией «Скала-48» с помощью косы (240 м) на каждом профиле в течение нескольких суток, получен набор псевдоразрезов наблюдаемых значений кажущегося электросопротивления. Полученные вариации кажущегося сопротивления характеризуют изменение электрических свойств верхней части разреза земной коры с 40-минутной дискретизацией во времени.



(а) вертикальная ось – значения кажущегося сопротивления (Ом·м), горизонтальная ось – кажущаяся глубина (м);



(б) цветом показаны градации кажущегося сопротивления, вертикальная ось – сгруппированные по глубине уровни кажущегося сопротивления в условных единицах, горизонтальная ось – условная точка измерения (расстояние по профилю, м).

**Рис. 2.** Пример выбора бракованных точек в режиме отображения всех профильных кривых кажущегося сопротивления мониторингового ЭТ-профиля «Сан-Таш» (2022 г.).

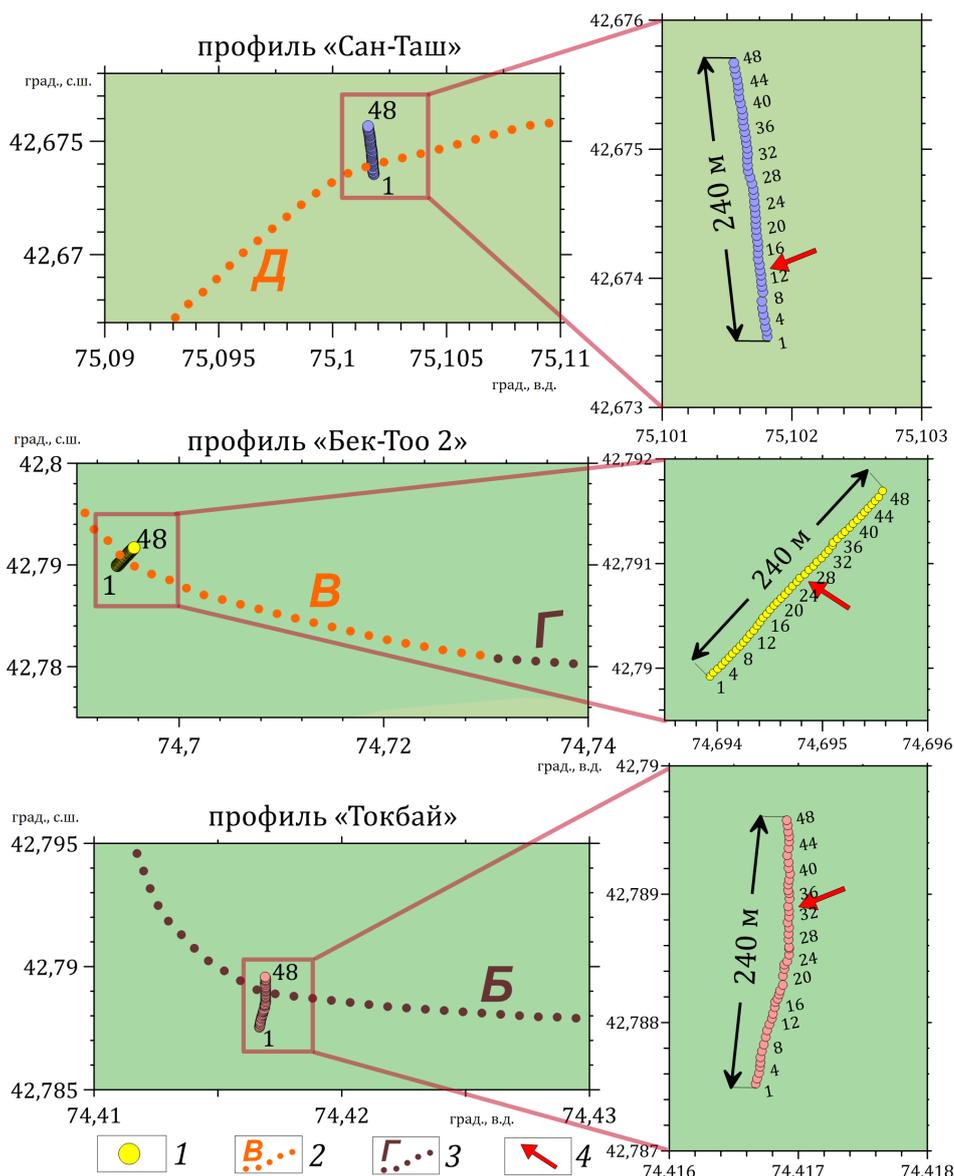
Для детального изучения вариаций кажущегося сопротивления осуществляется анализ отклонения кажущихся сопротивлений, полученных в течение каждой мониторинговой сессии (40-минутного цикла измерений всего профиля), от средних значений кажущихся сопротивлений за весь период мониторинга.

Такие относительные вариации кажущегося сопротивления  $\Delta\rho_k$  для каждой мониторинговой сессии вычислялись по формуле:

$$(\Delta\rho_k)_i = \frac{(\rho_k)_i - \rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{ср}}} \cdot 100\%,$$

где  $i$  – индекс, определяющий порядковый номер 40-минутной мониторинговой сессии;  $(\rho_k)_i$  – кажущиеся сопротивления для  $i$ -той сессии;  $\rho_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\rho_k)_i$  – осредненные значения кажущегося сопротивления для всего периода мониторинга.

На рисунках 4–6 проиллюстрированы относительные вариации кажущегося сопротивления для нескольких мониторинговых сессий, выполненных вдоль профилей «Сан-Таш», «Бек-Тоо 2» и «Токбай» соответственно. Отметим, что для всех профилей кажущиеся сопротивления в подавляющем большинстве случаев меняются в пределах  $\pm 8\%$ .



**Рис. 3.** Детальные карты-схемы расположения мониторинговых ЭТ-профилей «Сан-Таш», «Бек-Тоо 2» и «Токбай». Условные обозначения: 1 – расстановка электродов для ЭТ-наблюдений (48 электродов с шагом 5 м); 2, 3 – сегменты Иссyk-Атинского разлома по геологическим данным [Абдрахматов и Джумабаева, 2014]; 4 – места пересечения ЭТ-профилей линиями Иссyk-Атинского разлома.

Из анализа рисунков 4–6 следует, что наиболее контрастные относительные вариации кажущегося сопротивления вдоль профиля «Бек-Тоо 2» происходят на глубинах до ~24 м, а для профиля «Сан-Таш» – наоборот, на глубинах, превышающих ~24 м. Для обоих этих профилей также заметна и закономерность в суточных изменениях вариаций: за ~12 часов происходит смена знака вариации на противоположный, а более значимые вариации приходятся на дневное время. Для профиля «Токбай» характерна более резкая неоднородность в распределении относительных вариаций кажущегося сопротивления, при этом для большинства аномалий сохраняется закономерность смены знака вариации на противоположный.

Исходя из результатов предварительного анализа, полученного по трем профилям набора псевдоразрезов вариаций кажущегося сопротивления, определим одну кажущуюся глубину (24 м) в качестве индикативной с точки зрения дальнейшей оценки

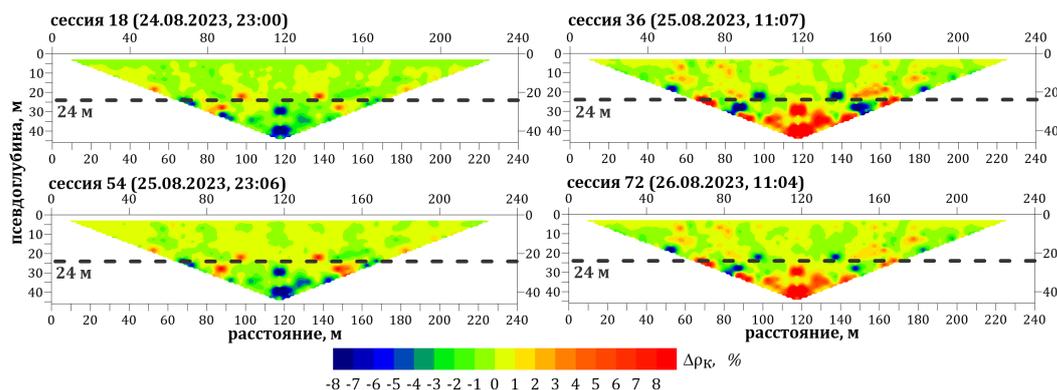


Рис. 4. Примеры относительных вариаций кажущегося сопротивления вдоль профиля «Сан-Таш» для различных мониторинговых сессий.

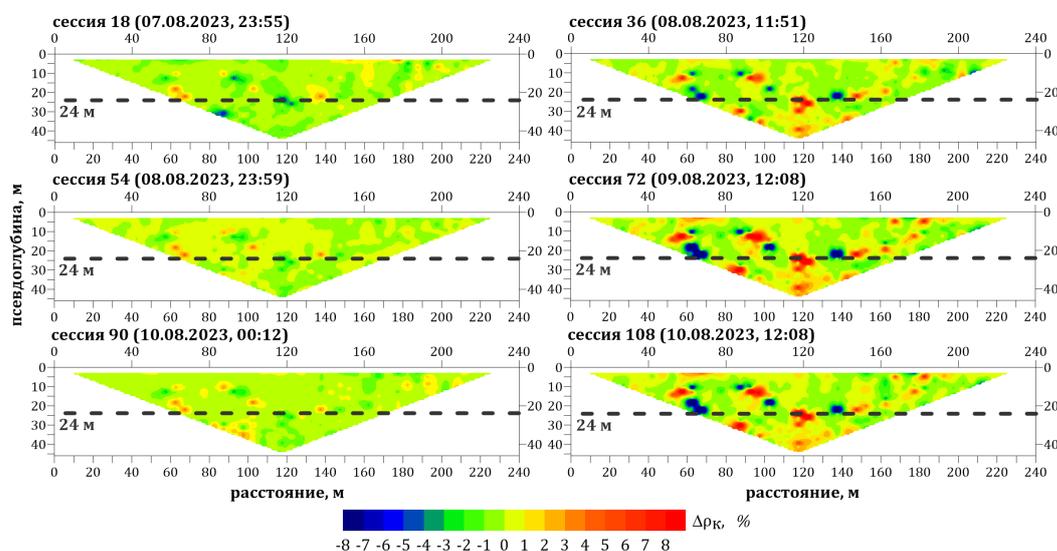


Рис. 5. Примеры относительных вариаций кажущегося сопротивления вдоль профиля «Бек-Тоо 2» для различных мониторинговых сессий.

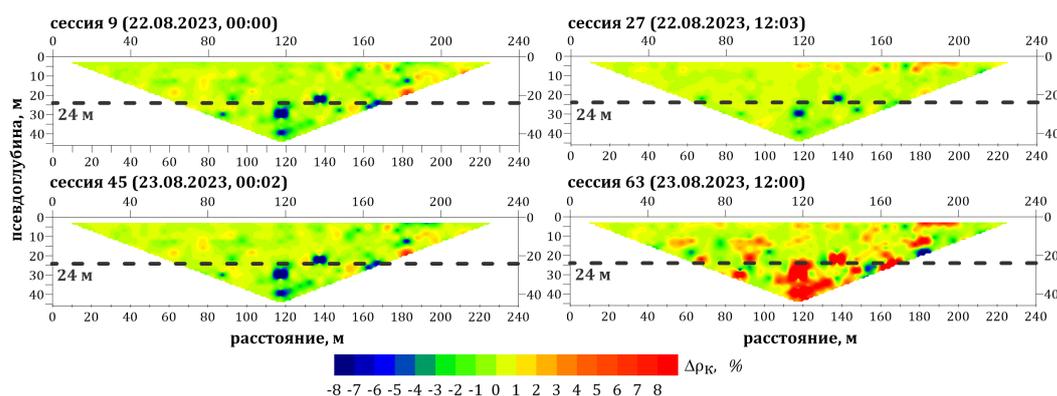


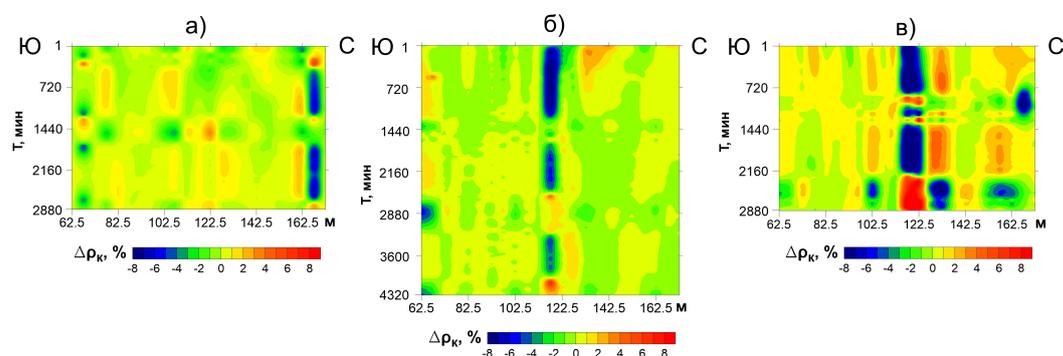
Рис. 6. Примеры относительных вариаций кажущегося сопротивления вдоль профиля «Токбай» для различных мониторинговых сессий.

характеристик вариаций кажущегося сопротивления, их корреляционной связи с параметрами лунно-солнечных твердых приливов и сопоставления аномальных изменений кажущегося сопротивления профилей мониторинга между собой.

### Вариации кажущихся сопротивлений (кажущаяся глубина 24 м) и их корреляция с лунно-солнечными приливами

Для кажущейся глубины 24 м на каждом профиле ЭТ-мониторинга рассмотрим результаты расчета и анализа величины двух параметров: амплитуды относительных вариаций кажущегося сопротивления и коэффициента линейной корреляции вариаций электросопротивления с лунно-солнечными твердыми приливами. Высокие значения этих параметров, по нашему мнению, могут свидетельствовать о современной геодинамической активности соответствующих участков зоны Иссук-Атинского разлома.

Для одновременного отображения относительных вариаций  $\rho_k$  был выбран способ построения площадной карты, где по оси абсцисс отложен участок ЭТ-профиля, соответствующий разностям электродов  $MN/2$ , а по оси ординат – время мониторинга  $T$  в минутах. В итоге, для кажущейся глубины 24 м на псевдоразрезах профилей «Сан-Таш» и «Токбай» длина оси ординат составила 2880 мин, на профиле «Бек-Тоо 2» – 4320 мин. Значения вариаций для всех профилей показаны в единой цветовой шкале в диапазоне от  $-8\%$  до  $8\%$ . Таким образом получены карты для 5 кажущихся глубин (4,8; 10,5; 14,4; 21 и 24 м). Для примера на рис. 7 показаны соответствующие карты для наиболее представительной кажущейся глубины 24 м, что, вероятно, связано с меньшим участком мониторингового профиля, «сфокусированным» на центральном пункте (вблизи  $MN/2 = 120$  м). Кроме того, более отчетливо выделяются аномалии на «особых» пунктах, что соответствует значениям максимального размаха аномальных значений в табл. 1. Анализируя рисунок, можно сделать вывод о том, что псевдоразрез неоднороден, и можно выявить определенные «особые» точки на каждом из профилей в разных областях исследуемого участка. Отдельное внимание стоит уделить также вертикальным неоднородностям, явно связанным с временным распределением «цветовых пятен», которое может быть связано как с внешним, так и внутренним воздействием.



**Рис. 7.** Результат построения вариаций  $\Delta\rho_k\%$  на кажущейся глубине 24 м для ЭТ профилей: (а) «Сан-Таш» по двухдневной сессии; (б) «Бек-Тоо 2» по трехдневной сессии; (в) «Токбай» по двухдневной сессии.

Численные операции проводились с наблюдаемыми значениями кажущегося сопротивления по мониторинговой записи на каждом электротомографическом профиле по отдельности. Для оценки наиболее чувствительных пунктов ЭТ-профиля для выбранной кажущейся глубины ( $h = 24$  м) были рассчитаны амплитуды размаха вариаций кажущегося сопротивления (в процентах). Результаты расчета сведены в табл. 1. Символом «x» в табл. 1 отмечены бракованные измерения.

На основании этих результатов были определены пункты профиля, имеющие максимальную амплитуду размаха вариаций кажущегося сопротивления. Для дальнейшего анализа на каждом профиле было выбрано по 3 таких пункта измерений. В итоге для кажущейся глубины  $h = 24$  м были определены следующие особые пункты на профилях ЭТ-мониторинга: (102,5; 122,5; 167,5 м) для «Сан-Таш», (62,5; 117,5; 132,5 м) для «Бек-Тоо 2» и (82,5; 97,5; 112,5 м) для «Токбай». Выбор особых пунктов также обусловлен высоким коэффициентом линейной корреляции вариаций электросопротивления с параметрами лунно-солнечных твердых приливов.

**Таблица 1.** Выбор пунктов для профилей «Сан-Таш» (I), «Бек-Тоо 2» (II) и «Токбай» (III) (кажущаяся глубина  $h = 24$  м) по амплитуде размаха относительных вариаций кажущегося сопротивления  $\rho_k(\%)$ . MN/2 – координата пункта измерения (расстояние по профилю, м).

MN/2	62,5	67,5	72,5	77,5	82,5	87,5	92,5	97,5	102,5	107,5	112,5	117,5
I	3,1	137,7	1,2	137,7	3,9	1,7	2,1	1,6	6,9	9,8	4,6	4,2
II	8,7	8,6	1,8	1,4	2,2	1,9	1,4	3,3	3,4	2,4	1,0	41,0
III	15,3	10,6	7,5	9,6	5,5	5,2	7,7	4,2	25,0	4,4	7,2	×
MN/2	122,5	127,5	132,5	137,5	142,5	147,5	152,5	157,5	162,5	167,5	172,5	
I	11,1	6,5	5,5	2,0	3,8	4,3	2,0	4,5	11,9	62,4	3,1	
II	5,6	4,7	4,7	4,0	5,1	1,5	1,9	2,5	2,0	2,5	1,6	
III	×	×	×	8,4	14,8	9,0	23,9	33,3	20,9	121,4	3,0	

Остановимся подробнее на оценке этих корреляционных связей.

Для центральной точки каждого профиля были рассчитаны параметры лунно-солнечных приливов с помощью программы TIDE\_3.exe [Баталева и др., 2013]. На вход программы подавались координаты центральных точек мониторинговых профилей (табл. 2), дата и время, совпадающие с началом сеанса мониторинга на профиле, а также задавался временной шаг, равный 40 минутам, для синхронизации коррелируемых временных рядов. В итоге для 1-суточной мониторинговой записи получено 36 значений параметров приливных вариаций, для 2-х суточной – 72, для 3-х суточной – 108. Программа рассчитывает три компонента приливообразующего ускорения ( $m/c^2$ ): две горизонтальные  $A_u$  – компонента «запад–восток»,  $A_v$  – компонента «юг–север», и одну вертикальную –  $A_n$ .

**Таблица 2.** Координаты центральных точек мониторинговых ЭТ-профилей

	Профиль	$\varphi^\circ$ , с. ш.	$\lambda^\circ$ , в.д.
I	«Сан-Таш»	42,6774	75,1013
II	«Бек-Тоо 2»	42,7908	74,6947
III	«Токбай»	42,7883	74,4169

В табл. 3 представлены коэффициенты линейной корреляции вариаций кажущегося сопротивления с лунно-солнечными приливами. Для расчета коэффициента линейной корреляции (корреляции Пирсона) использовалась формула [Корн и Корн, 1974]:

$$R = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}},$$

где в качестве переменных  $x$  и  $y$  использовались выборки временных рядов вариаций кажущегося сопротивления  $\rho_k$  и вертикальной компоненты ускорения  $A_n$  лунно-солнечных приливов, соответственно, а  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – средние значения этих выборок. Отметим, что коэффициент корреляции, определяющий связь между двумя числовыми рядами, является безразмерной величиной. При этом значения модуля коэффициента линейной корреляции, близкие к 1, соответствуют высокому уровню связи между рассматриваемыми числовыми рядами [Корн и Корн, 1974].

Отметим, что максимальные вариации кажущегося сопротивления верхней части разреза (кажущаяся глубина 24 м), имеющие корреляционную связь с лунно-солнечными приливами, распределены неоднородно в поперечных сечениях Иссык-Атинского разлома (вдоль профилей «Сан-Таш» и «Бек-Тоо 2») и локализованы в зоне, ширина которой составляет около 60–70 м. В более узкой полосе локализо-

**Таблица 3.** Результаты оценки линейной корреляции Пирсона для различных точек профилей ЭТ-мониторинга (кажущаяся глубина  $h = 24$  м)

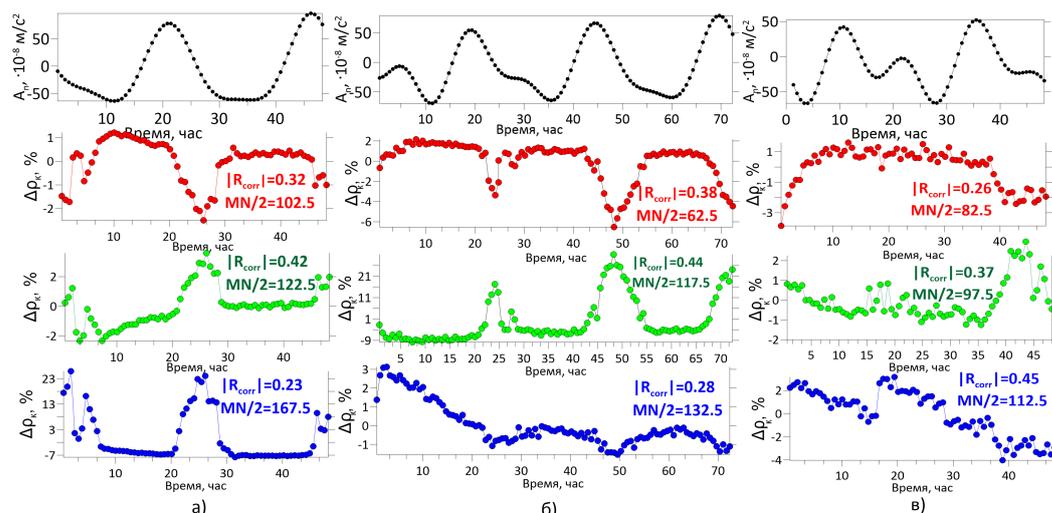
MN/2	«Сан-Таш» R	«Бек-Тоо 2» R	«Токбай» R
62,5	0,25	0,38	0,19
67,5	0,26	0,35	0,16
72,5	0,15	0,40	0,13
77,5	0,30	0,11	0,25
82,5	0,25	0,31	0,26
87,5	0,31	0,19	0,16
92,5	0,42	0,12	0,23
97,5	0,32	0,28	0,37
102,5	0,32	0,40	0,17
107,5	0,31	0,16	0,13
112,5	0,24	0,27	0,45
117,5	0,33	0,44	0,17
122,5	0,42	0,12	0,11
127,5	0,02	0,01	0,10
132,5	0,09	0,28	0,13
137,5	0,18	0,22	0,13
142,5	0,08	0,14	0,17
147,5	0,26	0,12	0,20
152,5	0,10	0,01	0,14
157,5	0,04	0,10	0,15
162,5	0,07	0,49	0,23
167,5	0,23	0,22	0,22
172,5	0,10	0,28	0,12

ваны максимальные вариации кажущегося сопротивления для кажущейся глубины 24 м поперечного сечения Иссык-Атинского разлома вдоль профиля «Токбай».

### Выводы

Основываясь на результатах мониторинговых электротомографических измерений в различных сегментах Иссык-Атинского разлома, нам удалось оценить динамику изменения кажущегося электросопротивления верхней части геоэлектрического разреза и выявить, какие блоки разломной зоны наиболее активны в геоэлектрическом (геодинамическом) смысле. В качестве критерия выделения таких активных сегментов разлома анализировались величины двух параметров (амплитуда вариаций электросопротивления и коэффициент корреляции вариаций электросопротивления с лунно-солнечными твердыми приливами).

Дополнительно отметим, что суточные изменения кажущегося сопротивления могут коррелировать не только с лунно-солнечными приливами, но и другими внешними факторами, которые меняются с такой же периодичностью и влияют на результаты измерений сопротивления. Основные из них – это температура, влажность грунта, интенсивность техногенных помех. С этой точки зрения рассмотренные в статье мониторинговые ЭТ-сессии были спланированы и проведены в период долговременной стабильности метеоусловий, а также в условиях минимума техногенных электромагнитных помех, соответственно, корреляцию этих факторов с вариациями сопротивления можно исключить.



**Рис. 8.** Вариации вертикальной компоненты ускорения  $A_n$  лунно-солнечных приливов для расчетной центральной точки и относительные вариации кажущегося сопротивления  $\Delta\rho_k(\%)$  на кажущейся глубине 24 м на 3-х пунктах профилей (нижние графики): (а) «Сан-Таш» ( $MN/2$  102,5; 122,5; 167,5 м) 42,6774°N, 75,1013°E, 28.08.2023 11:45 (GMT+6) – 26.08.2023 11:04 (GMT+6), (б) «Бек-Тоо 2» ( $MN/2$  62,5; 117,5; 132,5 м) 42,7904°N, 74,6944°E, 07.08.2023 12:15 (GMT+6) – 10.08.2023 12:08 (GMT+6), (в) «Токбай» ( $MN/2$  82,5; 97,5; 112,5 м) 42,7883°N, 74,4169°E, 21.08.2023 18:40 (GMT+6) – 23.08.2023 18:38 (GMT+6).  $R$  – рассчитанное значение коэффициента линейной корреляции вариаций  $A_n$  и  $\Delta\rho_k$ .

В результате выполненных электротомографических исследований подтверждена активность верхней части земной коры зоны Иссык-Атинского разлома, в том числе и его скрытых сегментов. На кажущейся глубине 24 м отмечена значимая чувствительность геоэлектрической структуры к лунно-солнечным приливным воздействиям. Такое поведение кажущегося сопротивления на этой глубине и его взаимосвязь с твердыми приливами в той или иной степени проявляется на всех трех профилях: «Сан-Таш», «Бек-Тоо 2» и «Токбай». При этом, для первых двух профилей наблюдаются некоторые закономерности в характере поведения вариаций сопротивления и распределении коэффициентов корреляции с лунно-солнечными приливами.

Также визуальный анализ рис. 7 позволяет сделать первые предположения о положении и размере зоны максимального динамического влияния Иссык-Атинского разлома (локализации концентрированной деформации), которая проявляется в аномальном изменении кажущегося сопротивления во времени и пространственно тяготеет к самому центру измерительной электротомографической установки для профилей «Бек-Тоо 2» и «Токбай».

Очевидно, что получены только предварительные результаты обработки и анализа экспериментальных материалов по детальному изучению активных геологических разломов Тянь-Шаня с помощью комплекса методов электромагнитных зондирований. Это только первый шаг на пути нашего научного познания «Что такое активный разлом на современном этапе развития Земли, каковы его внутреннее строение и его «жизненные позиции». Ценность этих предварительных результатов состоит в том, что они дают информационную опору и сравнительную базу для дальнейшего успешного продолжения исследований этой непростой проблемы современной геодинамики.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00567) сайт <https://rscf.ru/project/22-27-00567/>.

**Список литературы**

- «Скала-48». Многоэлектродная электроразведочная станция «Скала-48» для работы методом сопротивлений и вызванной поляризации: руководство пользователя. — 2019. — 50 с. — URL: <https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-48k12/> (дата обр. 19.09.2023).
- Абдрахматов К. Е., Джумабаева А. Б. Сегментация Исык-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Вестник Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики. — 2014. — № 1(3). — С. 24–30. — EDN: [YRRLFP](#).
- Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А. *и др.* Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. — 2012. — № 6. — С. 54–63. — EDN: [RZDIMJ](#).
- Баталева Е. А., Баталев В. Ю., Рыбин А. К. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов // Физика Земли. — 2013. — № 3. — С. 105–113. — DOI: [10.7868/S0002333713030034](https://doi.org/10.7868/S0002333713030034). — EDN: [PYSGQF](#).
- Баталева Е. А., Рыбин А. К., Баталев В. Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды // Геофизические исследования. — 2014. — Т. 15. — С. 54–63. — EDN: [TANHDR](#).
- Зарипов Р. М. Специфика электротомографии при анализе разломных зон Приольхонья (Западное Прибайкалье) // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2014. — № 3(86). — С. 56–65. — EDN: [RZOFHL](#).
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы. — Наука, 1974. — 831 с.
- Рыбин А. К., Баталева Е. А., Александров П. Н. *и др.* Электромагнитные исследования современных геодинамических процессов литосферы областей внутриконтинентальной орогении, на примере Тянь-Шаня // Физика Земли. — 2022. — № 5. — С. 98–115. — DOI: [10.31857/S0002333722050234](https://doi.org/10.31857/S0002333722050234). — EDN: [DLVQFE](#).
- Рыбин А. К., Забиякова О. Б., Баталева Е. А. *и др.* Геоэлектрическая модель зоны Исык-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Геофизика. — 2023. — № 3. — С. 45–50. — DOI: [10.34926/geo.2023.35.22.006](https://doi.org/10.34926/geo.2023.35.22.006). — EDN: [KKAOGI](#).
- Bataleva E. On the question of the relationship of variations in geophysical fields, lunar-solar tidal effects and seismic events // E3S Web of Conferences / ed. by N. Salikhov, B. Shevtsov, A. Vilayev. — 2019. — Vol. 127. — P. 02019. — DOI: [10.1051/e3sconf/201912702019](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912702019).
- Bataleva E. Features of the manifestation of lunar-solar tides in the electromagnetic parameters of the active fault zones of the Tien Shan // E3S Web Conf. / ed. by A. Dmitriev, N. Vodinchar, N. Salikhov, *et al.* — 2020. — Vol. 196. — P. 03003. — DOI: [10.1051/e3sconf/202019603003](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019603003).
- Loke H. M. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. — 2009. — 144 p.
- Rybin A., Bataleva E., Nepeina K. Deep Structure and Dynamics of the Issyk-Ata Fault (Northern Tien Shan) // Problems of Geocosmos—2022 / ed. by A. Kosterov, E. Lyskova, I. Mironova, *et al.* — Springer Proceedings in Earth, Environmental Sciences. Springer, Cham, 2023. — P. 213–226. — DOI: [10.1007/978-3-031-40728-4\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40728-4_15).

# STUDIES OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY MONITORING OF THE ISSYK-ATA FAULT ZONE (NORTHERN TIEN SHAN)

A. K. Rybin<sup>1</sup>, E. A. Bataleva<sup>1</sup>, O. B. Zabinyakova<sup>1</sup>, and K. S. Nepeina<sup>\*\*1</sup>

<sup>1</sup>Research Station RAS in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan

**\*\*Correspondence to:** K. S. Nepeina, neks@gdirc.ru

In 2023, monitoring geophysical studies were carried out using the electrical resistivity tomography (ERT) method along three profiles that cross the strike zone of the Issyk-Ata fault in the transverse direction. A detailed study was carried out of the observed variations in apparent electrical resistivity, which characterize the change in the electrical properties of the upper part of the Earth's crust section with a 40-minute discretization in time. Using the analysis of difference pseudo-sections of apparent resistivity, constructed based on the results of ERT monitoring, the most informative pseudo-depth interval from the point of view of geoelectric activity was determined for all three monitoring profiles. Accordingly, for a pseudo-depth of 24 m on each monitoring profile, an assessment was made of the geodynamic activity of these sections of the Issyk-Ata fault based on an analysis of the magnitude of two parameters: the amplitude of apparent resistivity variations and the correlation coefficient of electrical resistivity variations with lunar-solar solid tides. High values of these parameters, in our opinion, determine the location of modern active fault zones.

**Keywords:** Northern Tien Shan, Issyk-Ata fault, geodynamic activity, electrical monitoring, electrical resistivity tomography

Received: 2 November 2023

Accepted: 20 November 2023

Published: 30 November 2023



© 2023. The Authors.

**Citation:** Rybin, A. K., E. A. Bataleva, O. B. Zabinyakova and K. S. Nepeina (2023), Studies of the Electrical Resistivity Tomography Monitoring of the Issyk-Ata Fault Zone (Northern Tien Shan), *Russian Journal of Earth Sciences*, 23, ES4012, <https://doi.org/10.2205/2023ES000881> EDN: XWZYVR

## References

- «Skala-48». Multielectrode electrical prospecting station «Skala-48» for operation using the resistivity and induced polarization method: user manual. — 50 p. — URL: <https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-48k12/> (visited on 09/19/2023) ; (in Russian).
- Abdrakhmatov K. E., Dzhumabaeva A. B. Segmentation of the Issyk-Ata Fault (Northern Tien Shan) // Bulletin of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic. — 2014. — No. 1(3). — P. 24–30. — EDN: YRRLFP (in Russian).
- Balkov E. V., Panin G. L., Manshtein Y. A., *et al.* Electrotomography: equipment, methods and application experience // Journal of Geophysics. — 2012. — No. 6. — P. 54–63. — EDN: RZDIMJ (in Russian).
- Bataleva E. Features of the manifestation of lunar-solar tides in the electromagnetic parameters of the active fault zones of the Tien Shan // E3S Web Conf. / ed. by A. Dmitriev, N. Vodinchar, N. Salikhov, *et al.* — 2020. — Vol. 196. — P. 03003. — DOI: [10.1051/e3sconf/202019603003](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019603003).
- Bataleva E. A., Batalev V. Y., Rybin A. K. On the question of the interrelation between variations in crustal electrical conductivity and geodynamical processes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2013. — Vol. 49, no. 3. — P. 402–410. — DOI: [10.1134/S1069351313030038](https://doi.org/10.1134/S1069351313030038). — EDN: RKWBVN.

- Bataleva E. A., Rybin A. K., Batalev V. Y. Variations of Rocks Apparent Resistivity as an Indicator of Stress-Deformed State of the Medium // Geophysical research. — 2014. — Vol. 15, no. 4. — P. 54–63. — EDN: [TANHDR](#) (in Russian).
- Bataleva E. On the question of the relationship of variations in geophysical fields, lunar-solar tidal effects and seismic events // E3S Web of Conferences / ed. by N. Salikhov, B. Shevtsov, A. Vilayev. — 2019. — Vol. 127. — P. 02019. — DOI: [10.1051/e3sconf/201912702019](#).
- Korn G., Korn T. Handbook of mathematics for scientists and engineers: Definitions, theorems, formulas. — Science, 1974. — 831 p.
- Loke M. H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. — 2009. — 144 p.
- Rybin A. K., Bataleva E. A., Aleksandrov P. N., *et al.* Electromagnetic Studies of Present Geodynamic Processes in the Lithospheres of the Regions of Intracontinental Orogeny: the Tien Shan Example // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2022. — Vol. 58, no. 5. — P. 690–705. — DOI: [10.1134/S1069351322050093](#). — URL: <https://doi.org/10.1134/S1069351322050093>.
- Rybin A. K., Zabinyakova O. B., Bataleva E. A., *et al.* Geoelectric model of the Issyk-Ata fault zone (Northern Tien Shan) // *Journal of Geophysics*. — 2023a. — No. 3. — P. 45–50. — DOI: [10.34926/geo.2023.35.22.006](#). — EDN: [KKAOGI](#) (in Russian).
- Rybin A., Bataleva E., Nepeina K. Deep Structure and Dynamics of the Issyk-Ata Fault (Northern Tien Shan) // *Problems of Geocosmos—2022* / ed. by A. Kosterov, E. Lyskova, I. Mironova, *et al.* — Springer Proceedings in Earth, Environmental Sciences. Springer, Cham, 2023b. — P. 213–226. — DOI: [10.1007/978-3-031-40728-4\\_15](#).
- Zaripov R. M. Specificity of Electrical Resistivity Tomography in Analyzing Fault Zones of Priolkhonye (Western Baikal Region) // *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. — 2014. — No. 3(86). — P. 56–65. — DN: [RZOFHL](#) (in Russian).