

## Геоэлектрическая модель и мониторинговые исследования миниполигона Кентор (Северный Тянь-Шань)

Е.А. Баталева, А.К. Рыбин, К.С. Непейна, В.Е. Матюков  
Научная станция РАН в г. Бишкеке

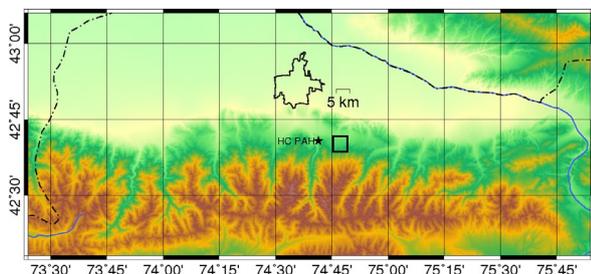
### АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются исследования, проводимые на территории миниполигона Кентор, направленные на изучение глубинного строения Бишкекского геодинамического полигона и мониторинг геодинамически активных зон. По результатам магнитотеллурических зондирований, выполненных в различных модификациях построены геоэлектрические модели для профилей «Кентор Западный», «Кентор Центральный» и «Кентор Восточный» и трехмерная модель распределения электропроводности земной коры миниполигона; адаптирована методика азимутального магнитотеллурического мониторинга; выполнены полевые эксперименты по комплексированию различных подходов геофизического мониторинга земной коры. Изучение вариаций электромагнитных параметров и электромагнитных явлений, обусловленных сейсмотектоническими процессами, подтвердило гипотезу о перераспределении флюидов в порово-трещинном пространстве, обусловленных деформационными процессами, в том числе и связанными с подготовкой сейсмических событий.

**Ключевые слова:** геоэлектрическая модель, активные разломные структуры

### ВВЕДЕНИЕ

Современные представления о геологическом строении геодинамически активной зоны сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины в районе Байтикской впадины, где расположен миниполигон Кентор, базируются на многочисленных исследованиях, которые проводились А.К. Трофимовым (1976), В.И. Макаровым (1977), О.К. Чедия (1986), К.Е. Абдрахматовым (1988) и другими. Структурно Байтикская впадина приурочена к зоне сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины, которая является крупным линейным структурным элементом горного сооружения Тянь-Шаня. Эта зона протягивается субширотно более чем на 350 км при ширине до 20 км и включает в себя разломы, флексуры, предгорные форберги и протяженные синклинальные прогибы по поверхности фундамента и в осадочном чехле.



**Рисунок 1.** Расположение миниполигона «Кентор» на топографической карте Северного Тянь-Шаня.

Миниполигон Кентор расположен в пределах северного склона и предгорий Киргизского

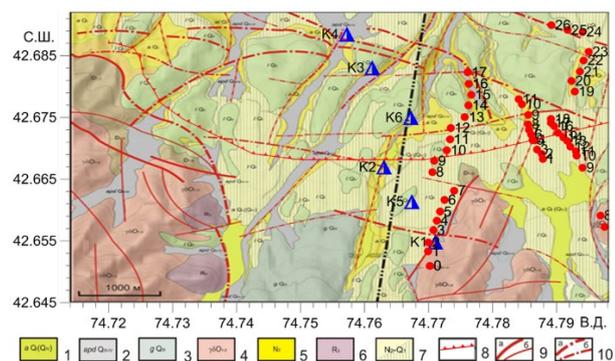
хребта (территория Бишкекского геодинамического полигона) к востоку от местоположения Научной станции РАН. Площадь миниполигона составляет примерно 7×5 км<sup>2</sup>. Целью проводимых исследований является анализ глубинного геоэлектрического строения зон динамического влияния разломов Северного Тянь-Шаня на предмет взаимосвязи с современными геодинамическими процессами и их мониторинг.

Основными объектами исследований служат зоны динамического влияния таких разломов Северного Тянь-Шаня как Шамси-Тюндюкский и Байтикский, перекрытых первыми сотнями метров четвертичных отложений, с высоким уровнем помех, обусловленных различными факторами, в том числе и работой электроимпульсной системы ЭРГУ-600-2.

Особое внимание было направлено на изучение влияния электрической анизотропии горных пород на результаты электромагнитных методов исследования. Причинами анизотропии свойств горных пород могут служить особенности их текстуры и структуры, наличие преобладающего направления трещиноватости, напряженно-деформированного состояния и др. Поэтому выявление зон повышенной трещиноватости и зон катаклаза блочно дезинтегрированных массивов гранитов, которые проявляются как аномалии высокой электропроводности на геоэлектрических разрезах является важным не только при мониторинге геодинамически активных зон, но и при изучении анизотропии физических свойств геологической среды.

Структурно-геологические исследования, выполненные сотрудниками Геологического

института и Научной станции РАН (НС РАН), на участках Южночуйской зоны в пределах Бишкекского геодинамического полигона были направлены на изучение позднекайнозойских тектонических деформаций. Данные исследования очень важны для формирования детальной геолого-тектонической основы проводимых здесь многолетних геофизических (магнитотеллурических и магнитовариационных) и геодезических (GPS и линейно-угловых) наблюдений (Пржиялговский, Кузиков, 2015).



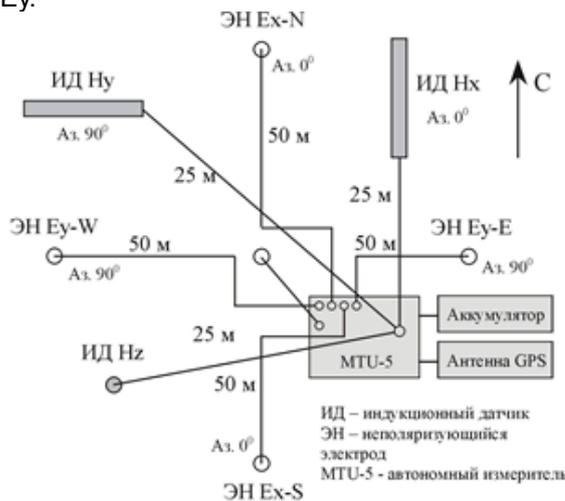
**Рисунок 2.** Геологическая схема и разрез участка «Кентор» Байтикской впадины (составил Е.С. Пржиялговский): 1) современные аллювиальные валунно-галечные отложения; 2) аллювиальные валунно-галечные отложения первой надпойменной террасы (здесь и далее штриховка – поверхность террасы); 3) глыбово-галечные гляциальные отложения; 4) ранне-среднеордовикские гранодиориты; 5) миоценовая галечно-дресвяно-песчаная толща; 6) рифейские комплексы нерасчлененные; 7 – граница распространения плейстоценовых валунников; 8) кровля шарпылдагских валунников (на разрезе); 9) активизированные разломы и зоны трещиноватости фундамента: а) главные; б) второстепенные; 10) активизированные разломы, предполагаемые под чехлом современных отложений: а) главные; б) второстепенные. Треугольники – пункты светодальномерной сети наблюдений, кружки с номерами – пункты МТЗ.

В настоящее время на миниполигоне Кентор выполняются исследования комплексом электромагнитных методов – методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ), электротомографии, методом сопротивлений, вызванной поляризации (ВП) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

### МЕТОДЫ

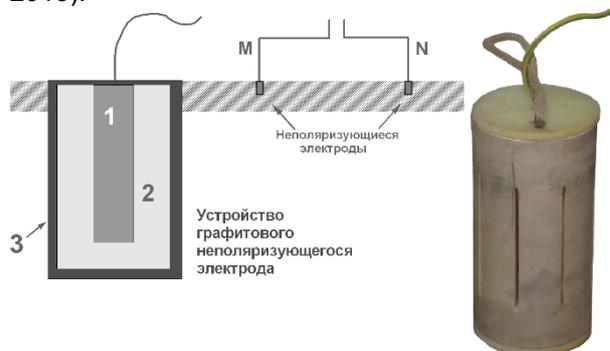
Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) – один из наиболее широко распространенных среди электроразведочных методов. Этот метод основан на изучении вариаций естественного электромагнитного

поля Земли, характеризуется высокой информативностью, хорошей разработанностью аппарата интерпретации, при этом относительно дешев и экологичен, Зондирование осуществляется путём регистрации вариаций в широком диапазоне частот. Применяемая «крестовая» измерительная установка состоит из двух взаимно перпендикулярных измерительных линий (диполей) M1N1 и M2N2, являющихся датчиками электрического поля  $E_x$  и  $E_y$ .



**Рисунок 3.** Измерительная установка станции MTU-5D для регистрации компонент МТ-поля.

Длина измерительных линий в условиях горного рельефа Тянь-Шаня составляет 50-100 м. Особенности проведения экспериментальных исследований методом МТЗ в горных условиях, потребовали создания устройств (электродов, шаблонов для установки датчиков и т.д.) имеющих оригинальную конструкцию. Так, заземление электрических диполей (Рисунок 3, 4) осуществляется с помощью неполяризующихся электродов, разработанных и созданных в Научной станции (Лосихин и др., 2013).



**Рисунок 4.** Измерение горизонтальных компонент электрического поля: 1 – угольный электрод; 2 – марганцево-угольная крошка; 3 – корпус.

На миниполигоне Кентор силами сотрудников

Научной станции РАН осуществляются исследования, направленные на решения нескольких задач:

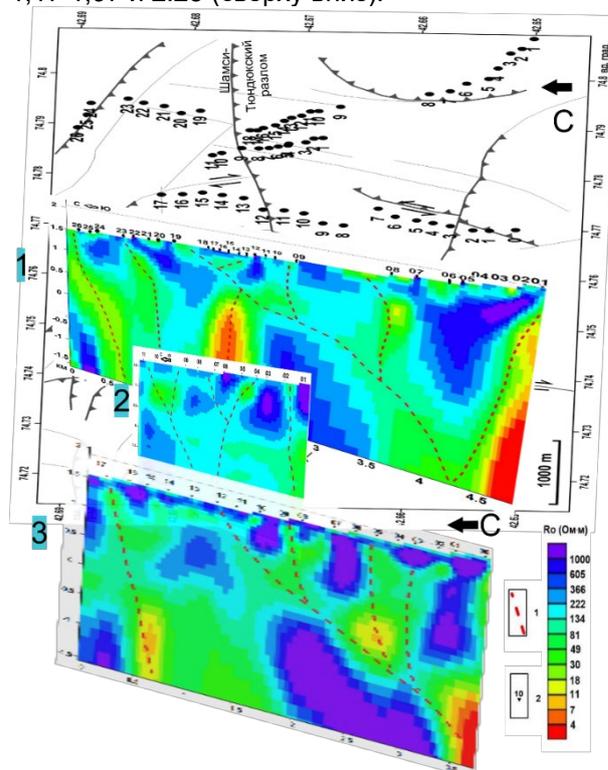
- изучение глубинного строения геодинамически активных зон (Рыбин и др., 2018);
- разработка физических, методических и геофизических основ геодинамического мониторинга (Баталева и др., 2017);
- изучение вариаций электромагнитных параметров и электромагнитных явлений, обусловленных сейсмотектоническими процессами (Баталева и др., 2014);
- изучение пространственно-временных особенностей распределения электропроводности (анизотропии) земной коры для построения детальной трёхмерной геоэлектрической модели (Баталева, Мухамадеева, 2018);
- постановка полевых экспериментов в рамках проведения комплексного геофизического мониторинга земной коры (Баталева и др., 2014; Баталева, Мухамадеева, 2018).

Для обработки полевых данных использовалось стандартное программное обеспечение станции Phoenix MTU-5 (программа SSMT 2000), основанное на корреляционном методе, что позволяет рассчитать функции взаимной корреляции всех компонент МТ-поля. Для повышения точности определения компонент тензора импеданса зашумленных помехами МТ-данных (ЛЭП, кошары, водотоки, скот), мы использовали как имеющиеся возможности комплекса обработки, так и новые подходы к обработке (Ермолин, 2011; Фельдман, Ермолин, 2011). 2D инверсия магнитотеллурических данных выполнена программой Rodi-Mackie (Rodi, Mackie, 2001). Программа реализует метод нелинейных сопряженных градиентов, который пытается минимизировать целевую функцию, представляющую собой сумму нормализованных невязок данных и сглаженности модели (Rodi, Mackie, 2001). Компромисс между невязками данных и сглаженностью модели контролируется параметром регуляризации  $t$ , который задается пользователем. Качественная и количественная интерпретация проводилась по методике, подробно рассмотренной в (Бердичевский и др. 1997; Бердичевский, Дмитриев, 2009).

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Входными данными инверсии по МТ-профилям миниполигона Кентор являются продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса, а также типпер для пунктов наблюдения (рисунок 2) в интервале периодов

от 0.01 до 1600 с. Сетка аппроксимационной модели для разных профилей («Кентор Западный», «Кентор Восточный» и «Кентор Центральный») состоит из 180, 162 и 122 ячеек, соответственно, по горизонтали, разреженных по краям модели и учащенных в окрестностях точек зондирования, и из, 107, 102 и 97 ячеек по вертикали, увеличивающихся по размерам с глубиной. При построении сетки учитывался рельеф местности. По вертикали использовалась равномерная сетка с размером ячейки 50 м до глубины 1,6 км. Для горизонтального разбиения размеры ячеек варьировались: 25 м, 50 м, 75 м, 100 м и т.д. Сопротивление стартовой модели – 100 ом\*м. Пределы погрешностей инвертируемых данных следующие: модуль кажущегося сопротивления (TE мода) – 100%, модуль кажущегося сопротивления (TM мода) – 10%, фаза импеданса (TE мода) – 5%, фаза импеданса (TM мода) – 5%, типпер - 0.01%. В результате нескольких тестовых расчетов инверсии было выбрано значение параметра регуляризации  $t$  равное 3. В результате выполнения 200 итераций получены модели, представленные на рисунке 5. Значение RMS-невязки составило 1,17 1,97 и 2.25 (сверху вниз).



**Рисунок 5.** Геоэлектрические модели миниполигона «Кентор» для профилей (сверху вниз) «Кентор Западный», «Кентор Центральный» и «Кентор Восточный».

На основе полученных геоэлектрических моделей была построена трехмерная модель распределения электропроводности земной

коры миниполигона Кентор по данным МТ-инверсии профилей «Кентор Западный», «Кентор Центральный» и «Кентор Восточный».

Параметры трехмерной модели распределения сопротивления:

Сетка из прямоугольных ячеек:

- 96 ячеек вдоль оси X (на восток)
- 96 ячеек вдоль оси Y (на север)
- 70 ячеек вдоль оси Z (вглубь)

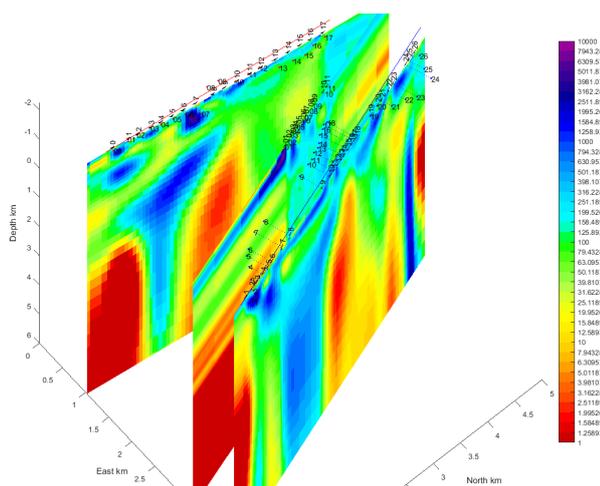
по осям X и Y:

- центральная часть сетки 72\*72 ячейки размером 70 на 70 м
- к краям сетки размер ячеек увеличивается экспоненциально в 2 раза на слой

По оси Z толщина экспоненциально возрастает:

- 15 слоев по 50 м до глубины 750 м
- 30 слоев по 50-250 м до глубины 4 км
- 10 слоев по 250-650 м до глубины 8 км
- 15 слоев от 650 м до 30 км до глубины 150 км

КМ



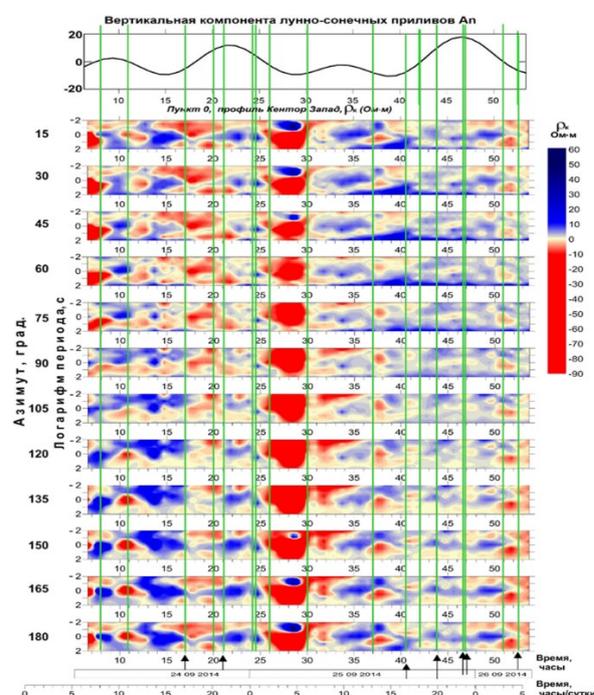
**Рисунок 6.** Трехмерная модель распределения электропроводности земной коры миниполигона Кентор по данным МТЗ.

### Обсуждение

Пункт «0» профиля «Кентор Западный» (режимный пункт магнитотеллурического мониторинга миниполигона Кентор) расположен на северном склоне Киргизского хребта на валунно-галечных отложениях конусов выноса, перекрывающих палеозойские толщи. Уровень кажущегося сопротивления в верхней части разреза для пункта «0» на профиле Кентор Западный в интервале периодов 0.01-1 с по продольной кривой кажущегося сопротивления составляет 350-150 Ом·м. Такие значения кажущегося сопротивления могут свидетельствовать о некоторой трещиноватости верхней части разреза и о присутствии в нём воды и, соответственно, возможен процесс перераспределения поровых жидкостей в

порово-трещинном пространстве горных пород при их деформировании.

На рисунке 7 представлены частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга кажущегося сопротивления с пункта «0» на профиле «Кентор Западный» (рисунок 2) в сопоставлении с распределением сейсмичности. Частотно-временные ряды (ЧВР) представляют собой форму визуализации изменчивости структуры измеряемых компонент электромагнитного поля (логарифм периода зондирования) при повороте системы координат на определенный угол (в градусах). На рисунке 7 представлены ЧВР с шагом 15 (30)° по азимуту, где отложены вариации кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ), т. е. разница между средним и текущим значениями по рассматриваемому азимуту.

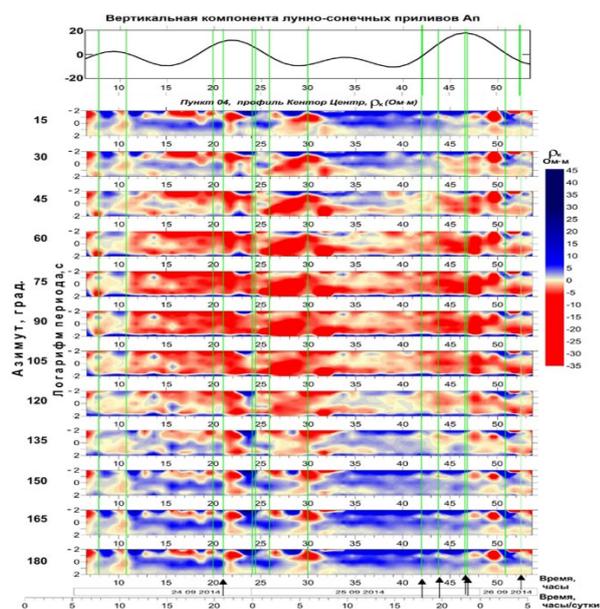


**Рисунок 7.** Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга кажущегося сопротивления с пункта «0» на профиле «Кентор Западный» в сопоставлении с сейсмичностью. Моменты землетрясений показаны стрелками.

В интервале времени 6-9 часов для периодов 1 сек-100 сек на азимутах 30° - 60° наблюдается уменьшение кажущегося сопротивления, а на азимутах 120° - 150° увеличение. Разница в азимутах противоположно направленных вариаций составляет около 90°, т. е. вариации кажущегося сопротивления за этот интервал времени могут быть обусловлены перераспределением жидкости в порово-трещинном пространстве и являются «когерентными по азимутам 45° и 135°». Для удобства дальнейшего изложения такие вариации будем называть «когерентными по

азимутам...». Далее по временному ряду в интервале времени 9-12 часов наблюдаются вариации когерентные по азимутам 60° и 150°. В интервале 25-30 часов выделяется очень контрастная радиальная вариация в диапазоне периодов  $0 < \log T < 2$ . Для этого же интервала времени, но в диапазоне периодов  $-2 < \log T < 0$  наблюдается вариация, когерентная по азимутам 15° и 105°. Многие особенности частотно-временных рядов фазы импеданса полностью или частично соответствуют рядам кажущегося сопротивления. Также в интервале 25-30 часов выделяется очень контрастная вариация радиальная для периодов больше 1 с и когерентная по азимутам 15° и 105° для высоких частот.

Моменты землетрясений, произошедших на расстояниях около 90 и 60 км к северо-западу от пункта наблюдения с  $K = 11.59$  и  $K = 7.9$ , являются самыми близкими из произошедших за время регистрации МТ-поля. Данные сейсмические события предваряются когерентными по азимутам 45° и 135° вариациями кажущегося сопротивления и фазы импеданса продолжительностью от 2 до 5 часов.



**Рисунок 8.** Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга кажущегося сопротивления с пункта «4» на профиле «Кентор Центральный» в сопоставлении с сейсмичностью. Моменты землетрясений показаны стрелками.

представлены частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга кажущегося сопротивления с пункта «4» на профиле Кентор Центральный (режимный пункт МТ- мониторинга миниполигона Кентор). В интервалах времени 6-7, 21-23, 29-31 49-50 часов для всех азимутов наблюдается уменьшение кажущегося сопротивления в верхней части частотного

диапазона ( $0 < \log T < 2$ ) Назовём такие изменения «радиальными вариациями», т.е. имеющими одну тенденцию (возрастание или убывание) для всех азимутов. Такой характер вариаций может быть интерпретирован либо влиянием электромагнитных помех, отражающихся на всех азимутах, либо в рамках гипотезы (Жамалетдинов и др., 2000; Vogatolov et al., 2007; Busby et al., 2000) о перераспределении поровых жидкостей в порово-трещинном пространстве - перемещением поровых жидкостей в вертикальном направлении. Оба этих варианта должны быть либо подтверждены, либо опровергнуты дополнительной информацией. В данном случае более вероятной является первая причина, так как наблюдаемый в районе миниполигона Кентор уровень промышленных электромагнитных помех высок и в некоторые моменты времени регистрация компонент МТ-поля затруднена. Аномальные изменения для остальных интервалов частотно-временных рядов азимутального МТ-мониторинга соответствуют гипотезе (Жамалетдинов и др., 2000; Vogatolov et al., 2007; Busby et al., 2000) о перераспределении поровых жидкостей в порово-трещинном пространстве, что морфологически выражается в ортогональности азимутов, на которых происходят вариации уменьшения и увеличения кажущегося сопротивления. В интервале времени от 25 до 33 часов для всех азимутов выделяется сложно построенная зона, в которой ортогональность азимутов положительных и отрицательных значений вариаций в целом хорошо соблюдена. За время наблюдения на частотно-временных рядах (рисунок 8) отмечается пониженное электросопротивление по азимутам 45°-120° и повышенное по 0°-45° и 120°-180°.

### Выводы

Таким образом, в результате проведения профильного МТ- мониторинга: определены геометрические и электрические характеристики областей пониженного сопротивления в полученных двумерных геоэлектрических разрезах; построена трехмерная модель распределения электропроводности земной коры; апробирована оригинальная методика и разработано программного обеспечения для профильного МТ- мониторинга; получены частотно-временные ряды многолетних наблюдений (2013-2021 гг), позволившие выявить динамику электромагнитных параметров верхней части земной коры; разработан принципиально новый комплекс методов анализа данных систем геофизического мониторинга, который показал свою

эффективность в поиске качественно новых предвестников сильных землетрясений; для повышения точности определения компонент тензора импеданса в процессе обработки практических МТ-данных адаптирована и использована амплитудно-фазовая коррекция; выполнен анализ взаимосвязи поведения вариаций электромагнитных параметров и распределения сейсмичности.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Дзалбу А.Н., Лосихина Л.Н., Матюкова Е.К., Петрова П.П., Тимонина Г.Н. и Черненко Д.Е. за содействие в проведении полевых исследований. Мансурова А.Н. за помощь в построении трехмерной модели распределения электропроводности земной коры миниполигона Кентор. Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Научной станции РАН на 2019-2021 гг. по теме АААА-А19-119020190063-2.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Баталева ЕА, Рыбин АК, Баталев ВЮ, 2014 Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды. Геофизические исследования, т. 15, № 4, с. 54-63
- Баталева ЕА, Забиякова ОБ, Баталев ВЮ, 2017 Разработка программного обеспечения для профильного магнитотеллурического мониторинга миниполигона Кентор. Вестник КРСУ, т.17, № 8, с. 150-153
- Баталева ЕА, Мухамадеева ВА, 2018 Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон). Geodynamics & Tectonophysics, № 2, с.461-487
- Бердичевский МН, Дмитриев ВИ, 2009 Модели и методы магнитотеллурики М: Научный мир
- Бердичевский МН, Дмитриев ВИ, Новиков ДБ, Пастуцан ВВ, 1997 Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ
- Епишкин ДВ, 2016 Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования. Вестник Московского университета, серия 4: геология, № 4, с. 40-46
- Ермолин ЕЮ, 2011 Амплитудно-фазовая коррекция кривых МТЗ дополнительного импеданса для двумерных сред. Записки Горного Института, 189, 23-26
- Жамалетдинов АА, Митрофанов ФП, Токарев АД, Шевцов АН, 2000 Влияние лунно-суточных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры. ДАН, т. 37, № 2, с. 235-239
- Лосихин ЛН, Матюков ЕК, Пазников ВА, Петров ПП, Тимонин ГН, 2013 Неполяризующийся электрод для наземной геофизической электроразведки. Патент на полезную модель RU 123979 U1 опубликовано 10.01.13 г.
- Пржиялговский ЕС, Кузиков СИ, 2015 Детальные морфоструктурные исследования в районе Бишкекского геодинамического полигона. Материалы докладов VI Международного симпозиума «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». Бишкек: ИС РАН, с. 11-17.
- Рыбин АК, Баталева ЕА, Баталев ВЮ, Матюков ВЕ, 2011 Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня. Вестник КРСУ, т. 11, №4, с.29-40
- Рыбин АК, Баталева ЕА, Матюков ВЕ, 2018 Детализация геоэлектрической структуры зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта (миниполигон Кентор) Вестник КРСУ, т.18, №12, с.134-140
- Рыбин АК, Леонов МГ, Пржиялговский ЕС, Баталев ВЮ, Баталева ЕА, Брагин ВД, Морозов Ю.А., Щелочков ГГ, 2016 Природа верхнекоровых электропроводящих горизонтов и инфраструктура гранитов Центрального Тянь-Шаня. ДАН, т.470, № 2, с. 215-218.
- Фельдман ИС, Ермолин ЕЮ, 2011 Амплитудно-фазовая коррекция кривых магнитотеллурического зондирования. Записки Горного института, т. 194, с. 200-210
- Bogomolov L, Bragin V, Fridman A, Makarov V, Sobolev G, Polyachenko E, Schelochkov G, Zeigarnik V, Zubovich A, 2007 Comparative analysis of GPS, seismic and electromagnetic data on the Central Tien Shan territory. Tectonophysics, v. 431, p. 143-151
- Busby JP, 2000 The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations. Geoph. Prospecting. v. 48, p. 677-695
- Rodi WL, Mackie RL, 2001. Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2-D Magnetotelluric Inversion. Geophysics, 66, 174-187. <https://doi.org/10.1190/1.1444893>.