

УДК 559.372(575.23)

## ДЕТАЛИЗАЦИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЫ И КИРГИЗСКОГО ХРЕБТА (МИНИПОЛИГОН КЕНТОР)

*А.К. Рыбин, Е.А. Баталева, В.Е. Матюков*

В результате инверсии кривых магнитотеллурического зондирования (МТЗ) построены геоэлектрические разрезы для трех профилей, выполненные в зоне сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта на территории миниполигона Кентор. Определены геометрические и электрические характеристики областей пониженного сопротивления в полученных геоэлектрических разрезах. По мнению авторов, проводящие объекты в геоэлектрических построениях представляют собой зоны повышенной трещиноватости и пористости, заполненные флюидом. В геоэлектрической структуре проявились скрытые разломные зоны, которые отсутствуют в поверхностных геологических данных.

*Ключевые слова:* глубинное строение; геоэлектрическая модель; кажущееся электросопротивление; векторы Визе; Чуйская впадина; Тянь-Шань.

---

## КЫРГЫЗ ТОО КЫРКАСЫ МЕНЕН ЧҮЙ ОЙДУҢУНУН КОШУЛУУ ТИЛКЕСИНИН ГЕОЛОГИЯЛЫК ТҮЗҮМҮН ДЕТАЛДАШТЫРУУ (КЕҢ-ТӨР КИЧИ ПОЛИГОНУ)

Кең-Төр кичи полигонунун аймагында Кыргыз тоо кыркасы менен Чүй ойдуңунун кошулуу тилкесинде аткарылган магнитотеллурикалык зонддоонун инверсиясынын натыйжасында үч профиль үчүн геоэлектрдик оюктар жасалды. Геоэлектрдик оюктардан алынган төмөнкү каршылыктары бар жерлердин геометриялык жана электрдик мүнөздөмөсү аныкталды. Авторлордун пикири боюнча геоэлектрдик курулмалардагы өткөрүүчү объекттер флюид менен толтурулган жаракалуулугу жогору жана топурагы майда тешиктүү аймактар болуп эсептелет. Аймактын үстүнкү бетинин геологиялык маалыматтарында байкалбаган, көрүнбөгөн жарылган жерлер геоэлектрдик түзүмүндө ачыкка чыкты.

*Түйүндүү сөздөр:* терендиктеги курулмалар; геоэлектрдик модель; электр каршылыктары; Визе векторлору; Чүй ойдуңу; Тянь-Шань.

---

## DETALIZATION OF GEOELECTRIC STRUCTURE OF THE JOINT ZONE OF THE CHUI BASIN AND THE KYRGYZ RIDGE (MINIPOLYGON KENTOR)

*A.K. Rybin, E.A. Bataleva, V.E. Matyukov*

As a result of the inversion of curves of magnetotelluric soundings (MTS), carried out in the junction zone of the Chui Basin and the Kyrgyz Ridge on the territory of the Kentor minipolygon, geoelectric sections for three profiles were constructed. The geometric and electrical characteristics of low resistance zones in the resulting geoelectric sections are determined. According to the authors, conductive objects in geoelectric models are increased fractured and porosity zones filled with fluid. The hidden fault zones are manifested in the geoelectric structure, but they are absent in the surface geological data.

*Keywords:* deep structure; geoelectric model; apparent resistance; Wiese vector; Chu Basin; Tien Shan.

Для детального изучения строения и динамики земной коры в зоне сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта были организованы комплексные геофизические наблюдения на территории миниполигона Кентор. Этот миниполигон расположен в пределах северного склона

и предгорий Киргизского хребта (территория Бишкекского геодинамического полигона) к востоку от базы Научной станции РАН. Площадь миниполигона составляет примерно 7×5 км<sup>2</sup>. Здесь заложены три профиля магнитотеллурического мониторинга (рисунок 1) и выполняются режимные

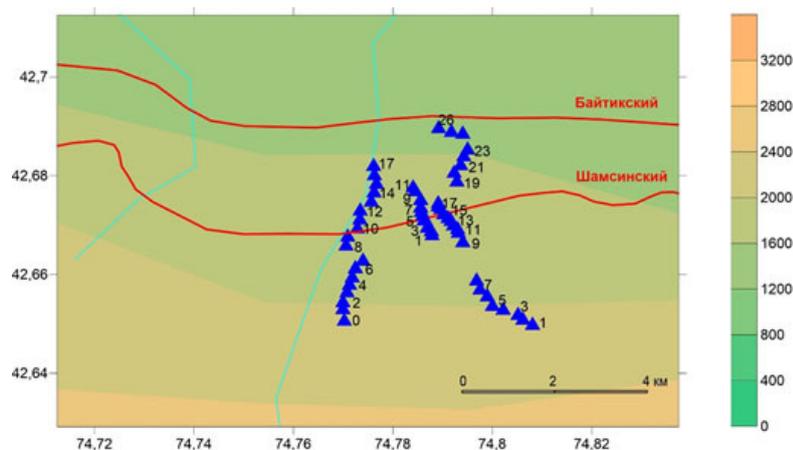


Рисунок 1 – Магнитотеллурические зондирования на миниполигоне Кентор. Слева направо: «Кентор-Западный», «Кентор-Центральный» и «Кентор-Восточный». Синими треугольниками обозначены пункты МТ-зондирования, красными линиями – Байтикский и Шамсинский разломы

геодезические наблюдения. В целом участок представляет собой полого-наклонную равнину с перепадом высот 1600–2000 м, которая ограничена с севера цепью пологих холмов, отделяющих Кенторскую котловину от более низменной Байтикской впадины, а с юга – отрогами Киргизского хребта и является зоной современной тектонической активизации, разделяющей Киргизский хребет (приподнятый блок фундамента) и Чуйской впадины (опущенный блок фундамента). Комплекс пород палеозойского складчато-метаморфического фундамента представлен разновозрастными раннепалеозойскими гранитоидами и метаморфизованными терригенными и вулканическими породами девонского и каменноугольного возраста, которые перекрываются маломощными отложениями осадочного чехла кайнозойского возраста [1].

Рассмотрим результаты магнитотеллурических исследований, выполненные на территории миниполигона Кентор, с точки зрения решения «структурной» задачи – изучение детального геоэлектрического строения земной коры этого района. Магнитотеллурические зондирования (МТЗ) осуществлялись здесь по трем профилям (см. рисунок 1).

Эти локальные профили МТЗ пересекают предгорную Байтикскую впадину в субмеридиональном направлении, их протяженность составляет от 1,1 км («Кентор-Центральный») до 4,7 км («Кентор-Восточный»), шаг зондирования от 100 до 200 м. Пункты наблюдений располагаются по линии профилей, направленных вкостростира основных структурных элементов геологического разреза. Участки профилей «Кентор-Западный» и «Кентор-Восточный» включают в себя горное обрамление, профиль «Кентор-Центральный»

полностью находится в пределах Байтикской впадины. Измерения выполняли с помощью аппаратуры Phoenix MTU-5 [2]. Регистрирующие блоки станций используют 24-х разрядный АЦП и GPS-приемники, обеспечивающие синхронизацию по времени с точностью 1 мкс. Диапазон измеряемых вариаций магнитотеллурического поля составляет от 0.001 до 1600 с. Средняя длительность записи одни сутки, иногда, в случае неблагоприятных погодных условий, запись МТ-поля продолжается до получения качественных кривых. Измерение трех компонент магнитного поля проводили с помощью штатных индукционных датчиков МТС-50, ориентированных на север, восток и вертикально. Компоненты электрического поля измеряли диполями длиной 50 м, заземленными неполяризующимися электродами с марганцево-угольной крошкой, разработанными и запатентованными Научной станцией РАН [3]. Методика обработки и интерпретации данных МТЗ включает в себя построение частотных зависимостей компонент тензора импеданса и их трансформант-кривых кажущегося сопротивления и фаз импеданса; качественный анализ МТ-данных; сбор априорной геолого-геофизической информации и построение геоэлектрических разрезов по результатам 2D-интерпретации данных МТЗ.

Обработку записей проводили в программе SSMТ 2000, входящей в штатный пакет программ аппаратуры Феникс [4] и в программе ЕРІ-КІТ геофизической компании ООО «Северо-Запад» [5]. На втором этапе обработки с помощью программы МТ-Corrector [6] было произведено осреднение импедансных кривых. Для получения итоговой средней кривой выполнялась процедура

сплайн-аппроксимации. При проведении сплайнов использовался набор полученных оценок из 20 реализаций SSMТ-2000 и 10 реализаций EPI-KIT. Компоненты типпера определены вполне устойчиво, что дает возможность надежно отрисовать сводную кривую и использовали эти данные в инверсии. Дополнительные компоненты тензора импеданса имеют значительный разброс в большинстве случаев. Поэтому, основное внимание было уделено главным компонентам тензора импеданса.

Для определения тензора импеданса достаточно проводить измерение 4-х компонент электромагнитного поля –  $E_x, E_y, H_x, H_y$ . Если на пунктах наблюдения дополнительно регистрируются вариации вертикальной компоненты магнитного поля, что для магнитотеллурических зондирований, выполняемых Научной станцией РАН, является обязательным условием, то можно использовать методику Визе с построением одноименных векторов. Векторы Визе определяли по соотношению трех компонент геомагнитных вариаций в одной точке наблюдения и характеризуют неоднородность распределения индуцированных в Земле электрических токов, а, следовательно, и неоднородность распределения электропроводности:

$$H_z = W_{zx} H_x + W_{zy} H_y.$$

Они направлены от проводника перпендикулярно направлению избыточных токов в нем. Векторы Визе (индукционные стрелки, типперы) строятся по вещественным и мнимым частям компонент матрицы Визе – Паркинсона  $W$ :

$$\overline{ReW} = \text{Re} W_{zx} \overline{I_x} + \text{Re} W_{zy} \overline{I_y},$$

$$\overline{ImW} = \text{Im} W_{zx} \overline{I_x} + \text{Im} W_{zy} \overline{I_y}.$$

Вектор  $\text{Re}W$  называется вещественным или реальным вектором. Он характеризует влияние токов, которые находятся в фазе с магнитным полем. Вектор  $\text{Im}W$  называется мнимым вектором, он характеризует влияние реактивных избыточных токов, то есть токов, которые отличаются от фазы горизонтального магнитного поля на  $90^\circ$ .

Отличительной особенностью вещественных векторов является то, что они направлены от зон повышенной электропроводности к зонам пониженной электропроводности. Это свойство векторов Визе позволяет локализовать геоэлектрические структуры, отличающиеся повышенной или пониженной электропроводностью. Построение карт вещественных векторов обеспечивает лучшую наглядность изображения горизонтальных изменений электропроводности [7, 8]. Анализ векторов

Визе – Паркинсона позволяет локализовать зоны проводящих неоднородностей с достаточной надежностью на всех глубинах. На рисунке 2 показаны вещественные векторы Визе для всех трех профилей для периода  $T = 1$  с.

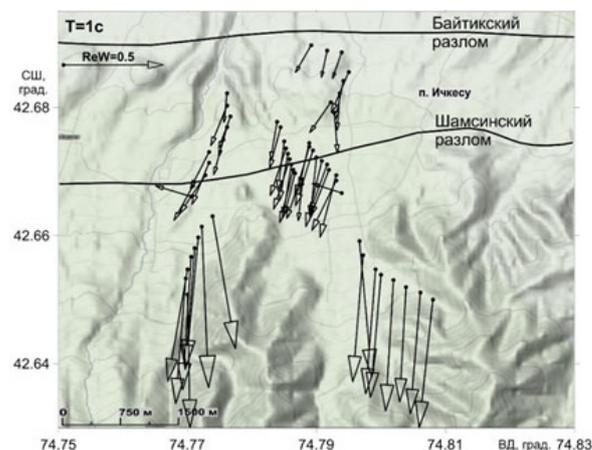


Рисунок 2 – Индукционные вектора Визе для пунктов профилей: «Кентор-Западный», «Кентор-Центральный» и «Кентор-Восточный» на периоде  $T = 1$  с

Обычно на коротких периодах индукционные стрелки над впадинами направлены хаотично, что может быть связано с высоким уровнем приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Однако здесь мы наблюдаем закономерное распределение векторов Визе для всех рассматриваемых периодов, практически все стрелки направлены от проводящего осадочного чехла Чуйской впадины (Предкиргизский прогиб) и их поведение обусловлено этим влиянием. Для периода  $T = 1$  с наблюдается четко выраженное различие размеров индукционных стрелок для бортовой части впадины и ее центральной части. Такое поведение векторов Визе говорит о наличии мощной проводящей структуры севернее Байтикской впадины, где и находится Предкиргизский прогиб. С увеличением периода индукционные стрелки практически во всех пунктах зондирования, расположенные как во впадине, так и на ее борту, слаженно направлены от проводящего тела и становятся одинаковыми по величине. На основании анализа МТ-параметров неоднородности ( $N$ ) и асимметрии ( $skew$ ) был сделан вывод о возможности построения двумерной модели для территории мини-полигона Кентор. Эти выводы подтверждаются и полярные диаграммы, построенные на периодах 0,1, 1, 10, 100 и 1000 секунд для каждого профиля.

Двумерная сглаживающая инверсия МТ-данных по профилю «Кентор-Центральный»

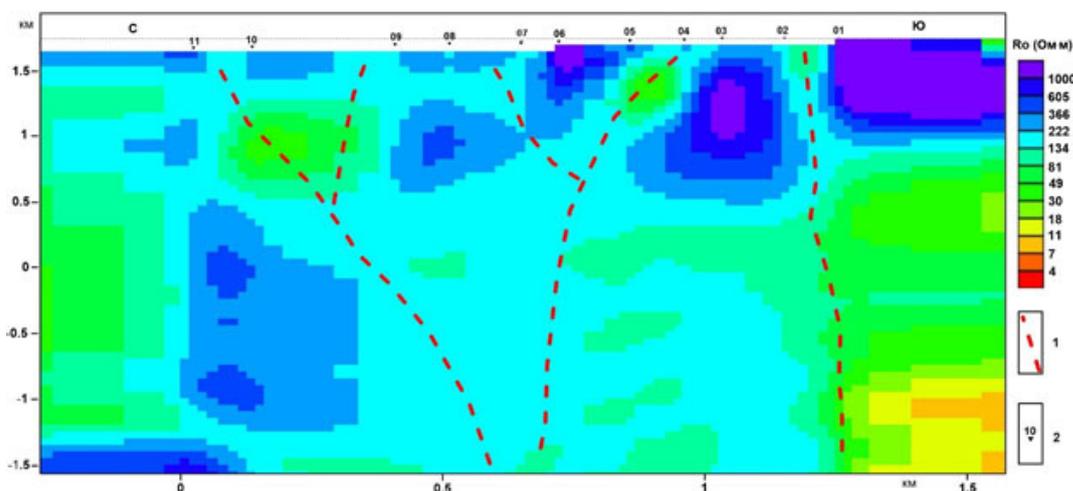


Рисунок 3 – Геоэлектрическая модель (верхняя часть разреза, до глубин 1,6 км) для профиля «Кентор-Центральный» – результаты 2D-инверсии: 1) предполагаемые тектонические нарушения; 2) пункты наблюдения. Цветовая шкала – десятичный логарифм удельного сопротивления в Ом·м

«Кентор-Восточный» была выполнена в программе Rodi-Mackie [9]. Программа реализует метод нелинейных сопряженных градиентов, который пытается минимизировать целевую функцию, представляющую собой сумму нормализованных невязок данных и сглаженности модели [9]. Компромисс между невязками данных и сглаженностью модели контролируется параметром регуляризации, который задается пользователем.

Входными данными инверсии по профилю «Кентор-Центральный» являются продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса и типпер по 11 пунктам наблюдения в интервале периодов от 0.01 до 1600 с. Сетка аппроксимационной модели состоит из 122 ячеек по горизонтали, разреженных по краям модели и учащенных в окрестностях точек зондирования, и из 102 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 равное 3. В результате

выполнения 200 итераций получена модель, представленная на рисунке 3. Значение RMS-невязки составило 2,25.

Входными данными инверсии по профилю «Кентор-Восточный» являются продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса и типпер по 26 пунктам наблюдения в интервале периодов  $T = 0,01-1600$  с. Сетка аппроксимационной модели состоит из 162 ячеек по горизонтали, разреженных по краям модели, и учащенных в окрестностях точек, 107 ячеек по вертикали, увеличивающихся по размерам с глубиной. Инверсия была выполнена аналогично профилю «Кентор-Центральный».

Значение RMS-невязки составило 1,17.

На геоэлектрическом разрезе для профиля «Кентор-Центральный» (рисунок 3) под пунктом 5 выделяется зона сочленения двух структур с аномальными электрическими свойствами. По форме аномальная зона напоминает разломную структуру, с очень крутым, практически вертикальным, углом падения, которая прослеживается на двух других МТ-профилях и может соответствовать Шамси-Тюндюкскому разлому. Более крупная разломная зона находится между пунктами зондирования 10 и 11, только угол падения этого тектонического нарушения более пологий, глубина залегания от дневной поверхности до глубин порядка 2-х километров. Эта часть профиля может соответствовать активизированному разлому, наличие которого под чехлом современных отложений предполагается геологическими исследованиями [1], скорее всего эта же структура проявляется и на

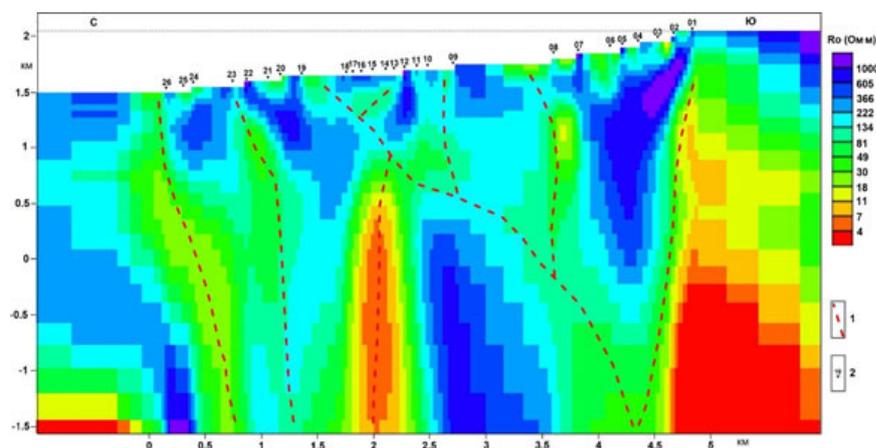


Рисунок 4 – Геоэлектрическая модель (верхняя часть разреза, до глубин 1,6 км) для профиля «Кентор-Восточный» – результаты 2D-инверсии: 1) предполагаемые тектонические нарушения; 2) пункты наблюдения. Цветовая шкала – десятичный логарифм удельного сопротивления в Ом·м

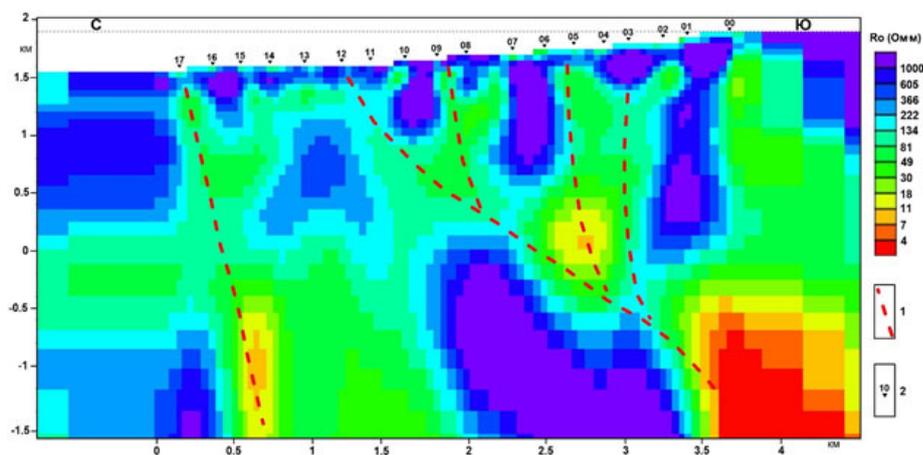


Рисунок 5 – Геоэлектрическая модель (верхняя часть разреза, до глубин 1,6 км) для профиля «Кентор-Западный» – результаты 2D-инверсии: 1) предполагаемые тектонические нарушения; 2) пункты зондирования. Цветовая шкала – десятичный логарифм удельного сопротивления в Ом·м

геоэлектрической модели профиля «Кентор-Восточный» (рисунок 4) под пунктом зондирования 19.

Для профиля «Кентор-Западный» (рисунок 5) входными данными для инверсии также были продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса и типпер по 18 пунктам наблюдения в интервале периодов от 0,01 до 1600 с. Сетка аппроксимационной модели состоит из 180 ячеек по горизонтали, разреженных по краям модели и учащенных в окрестностях точек зондирования, и из 97 ячеек по вертикали, увеличивающихся в размерах с глубиной. При построении сетки учитывался рельеф местности. Остальные параметры инверсии были заданы согласно расчетам на других профилях. Значение RMS-невязки составило 1,97.

На рисунке 5 представлена модель 2D-инверсии, построенная на основе выполненных МТЗ по профилю «Кентор-Западный». В северной части профиля (пункт зондирования 17) в верхней части разреза выделяется зона пониженного сопротивления, расположенная от дневной поверхности до глубины порядка 6–7 км. По форме аномальная зона напоминает разломную структуру с достаточно крутым углом падения. Эта часть профиля соответствует главному активизированному разлому, наличие которого под чехлом современных отложений предполагается геологическими исследованиями [1]. Аналогичный разлом находится под пунктом зондирования 12, только угол падения этого тектонического нарушения более пологий. На геоэлектрическом разрезе также выявлены

скрытые разломные зоны под пунктами 09 и 06, которых нет на геологической карте что может служить дополнительной информацией о глубинном строении Байтикской впадины. Что касается высокоомного объекта, расположенного на глубинах около полутора километров от дневной поверхности под пунктами зондирования 09–02 (рисунок 3), то он, скорее всего, представляет собой выступ палеозойского фундамента. Рядом с ним находится зона повышенной трещиноватости фундамента, что соответствует пунктам зондирования 16–10 геоэлектрической модели, где на глубине порядка 1,5 км находится объект повышенной электропроводности. Природу повышенной электропроводности в верхней части разреза Байтикской впадины, логичнее всего связать с наличием флюида в порово-трещинном пространстве, что может понижать электрическое сопротивление горных пород [10]. Это предположение хорошо согласуется с процессом деструкции гранитного фундамента, который проявляется в различных формах, на разном масштабном уровне и обусловлен комплексом физико-механических факторов [11]. Потенциальная неизбежность механического разрушения гранитов заложена в специфике их первичной структуры и минералогии. Тектонический стресс приводит к оживлению протоструктур и возникновению новых, что реализуется в преобразовании первично монолитных пород в раздробленную, пористую субстанцию.

**Выводы.** Таким образом, с помощью метода МТЗ определено детальное глубинное строение земной коры в зоне сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта на участке Байтикской впадины (территория миниполигона Кентор). Построены геоэлектрические модели по профилям «Кентор-Западный», «Кентор-Центральный» и «Кентор-Восточный». Определены геометрические и электрические характеристики областей повышенной проводимости в построенных геоэлектрических разрезах. По результатам выполненных исследований дополнена и детализирована верхняя часть геоэлектрического разреза миниполигона Кентор, уточнены характеристики активизированных разломных структур, как главных (Шамси-Тюндукский разлом), так и второстепенных, более низкого ранга. Под чехлом современных отложений в геоэлектрических разрезах выделены так называемые скрытые разломные структуры.

Не противореча в целом результатам геологической съемки, выполненной на территории миниполигона Кентор [1], построенные геоэлектрические модели демонстрирует важные новые черты строения земной коры для этой территории. Основным интерес представляют выявленные

проводящие зоны в верхней части геоэлектрического разреза (рисунки 3–5). Природа аномальной проводимости этих зон может иметь различное происхождение. С одной стороны, проводящие структуры кристаллического фундамента могут быть объяснены зонами повышенной трещиноватости и пористости, заполненными флюидами, с другой стороны, некоторые исследователи увязывают аномалии электропроводности с присутствием электроннопроводящих пород. Удельное электрическое сопротивление пород существенно уменьшается в обводненных, тектонически нарушенных зонах. Отсутствие мощного осадочного чехла во внутригорных впадинах, каковой является Байтикская впадина, создает благоприятные условия для выделения таких проводящих зон в коре, в том числе зон, связанных с тектоническими нарушениями.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №16-05-00357, грант №17-05-00654).

#### Литература

1. Пржиялговский Е.С. Детальные морфоструктурные исследования в районе Бишкекского геодинамического полигона / Е.С. Пржиялговский, С.И. Кузиков // В сб.: Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: матер. докл. 6-го Межд. симп. Бишкек: ИС РАН, 2015. С.11–17.
2. Fox L. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System, U.S. Patent № 6 191 587 B1, issued February 20, 2001.
3. Неполаризующийся электрод для наземной геофизической электроразведки. Патент на полезную модель RU 123979 U1 / Л.Н. Лосихин, Е.К. Матюков, В.А. Пазников и др.; заявитель и патентообладатель Научная станция РАН, опубликовано 10.01.2013 г.
4. Data Processing User Guide / Toronto: Stuart Rogers. 2005. 201 p.
5. Епишкин Д.В. Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования / Д.В. Епишкин // Вестник Моск. ун-та. Серия 4: Геология. 2016. № 4. С. 40–46.
6. МТ-Corrector [Электронный ресурс]. URL: <http://nw-geo.ru/products/software/mt-corrector/> (дата обращения: 08.10.2018).
7. Бердичевский М.Н. Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. М.: Научный мир. 2009. 680 с.
8. Баталева Е.А. Разработка программного обеспечения для профильного магнитотеллурического мониторинга миниполигона Кентор / Е.А.

- Баталева, О.Б. Забиякова, В.Ю. Баталев // Вестник КPCУ. 2017. Т. 17. № 8. С. 150–153.
9. *Rodi W.L.* Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion / W.L. Rodi, R.L. Mackie // *Geophysics*. 2001. V. 66. P. 174–187.
10. *Рыбин А.К.* Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических зондирований / А.К. Рыбин. М.: Научный мир, 2011. 272 с.
11. *Рыбин А.К.* Природа верхнекоровых электропроводящих горизонтов и инфраструктура гранитов Центрального Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, М.Г. Леонов, Е.С. Пржиялговский, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, В.Д. Брагин, Ю.А. Морозов, Г.Г. Щелочков // Доклады АН. 2016. Т. 470. № 2.