

УДК 550.372

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ НА ПРОФИЛЕ ЯЛТА – НОВОСЕЛОВКА В КРЫМУ

Д.О. Десятов¹, П.Ю. Пушкарев¹, И.И. Рокитянский², А.Г. Яковлев^{1, 3}¹ МГУ имени М.В. Ломоносова. 119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: dima10des@gmail.com² Институт геофизики имени С.И. Субботина НАНУ. 03680, Украина, г. Киев, пр. Палладина, д. 32³ ООО «Северо-Запад». 108811, Россия, г. Москва, бизнес-центр «Румянцево», А-412

Аннотация. В статье представлены результаты магнитотеллурических зондирований вдоль профиля Ялта – Новоселовка, пересекающего Ай-Петринскую яйлу и учебный полигон МГУ. Описывается методика полевых наблюдений и обработки магнитотеллурических данных, полученных в условиях с сильной промышленной помехой. Приведены результаты двумерной интерпретации зондирований. Обнаружена аномалия электропроводности, приуроченная к Предгорному разлому.

Ключевые слова. Магнитотеллурические зондирования, аномалии электропроводности, Горный Крым.

MAGNETOTELLURIC SOUNDINGS ON YALTA – NOVOSYLOVKA PROFILE IN CRIMEA

D.O. Desyatov¹, P.Yu. Pushkarev¹, I.I. Rokityansky², A.G. Yakovlev^{1, 3}¹ Lomonosov Moscow State University. Leninskie gory 1, Moscow, Russia, 119234; e-mail: dima10des@gmail.com² Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine. Palladin av. 32, Kiev, Ukraine, 03680³ Nord-West Ltd. Business center Rumyantsevo A-412, Moscow, Russia, 108811

Abstract. The paper presents the results of magnetotelluric soundings along the profile Yalta – Novosylovka, crossing the Ai-Petri mountain and the MSU training ground. We consider methods of observation and processing of magnetotelluric data, obtained in abundant industrial noise area. Results of two-dimensional data interpretation are described. The electric conductivity anomaly, associated with the Predgorny fault, was revealed.

Key words. Magnetotelluric soundings, electric conductivity anomalies, Mountainous Crimea.

ВВЕДЕНИЕ. Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) основан на изучении естественного низкочастотного электромагнитного поля Земли. Метод позволяет получать информацию о проводниках в земной коре и верхней мантии, о физических свойствах глубинных пород, дает хорошие результаты при поиске полезных ископаемых, решении инженерно-геологических и других задач.

Несмотря на хорошую доступность, Горный Крым, по сравнению с другими горно-складчатыми сооружениями, такими как Кавказ или Тянь-Шань, в отношении глубинного строения изучен слабо. Крымский полуостров – сложный с точки зрения геологического строения регион [4, 5, 11]. Наличие двумерных и трехмерных локальных неоднородностей (разломы, погребенные вулканы и др.) усложняет интерпретацию любых геофизических данных, в том числе магнитотеллурических (МТ). На сегодняшний день Крымский полуостров является геодинамически активной зоной, что предопределяет необходимость исследования его глубинного строения, выявления разломов, оценки флюидного и реологического режимов недр.

Настоящая статья посвящена результатам исследований методом МТЗ в Горном Крыму по профилю Ялта – Новоселовка. В статье описывается методика полевых наблюдений и обработки полученных МТ-данных, нацеленная на борьбу с промышленными электромагнитными помехами, анализируются передаточные функции МТ-поля и их инвариантные характеристики, представлены результаты 2D-интерпретации МТ-данных.

Строение и геологическое развитие Крымского полуострова содержит много нерешенных вопросов, важных для понимания геодинамики региона, сейсмической опасности, поисков полезных ископаемых и оптимального экологически сбалансированного ведения хозяйства.

Геофизические методы, в частности геоэлектрика, могут дать существенный вклад в решение этих вопросов. Результаты геоэлектрических исследований в Крыму описаны примерно в 100 публикациях и отчетах (частично они перечислены в [2]). Здесь мы приведем результаты новых исследований, позволяющих оценить геоэлектрическое строение верхних горизонтов, показать трудности достоверного выделения глубинных объектов и наметить пути их преодоления.

Очерк истории глубинных геоэлектрических исследований Крыма

В Крыму на обсерватории в Алуште в 1957 г. были начаты наблюдения пяти компонент естественного электромагнитного поля Земли, по результатам которых было выполнено одно из первых в мире глубинных МТЗ в диапазоне периодов от 10 с до 3 часов [9] (рис. 1). МТЗ в Алуште оказалось удивительно удачным – полученный четырехслойный разрез грубо, но правильно описал основные параметры одномерного глобального распределения электропроводности земной коры и верхней мантии. В локальном плане была определена суммарная продольная проводимость осадочной толщи S1 порядка 120 См, примерно такая же величина S1

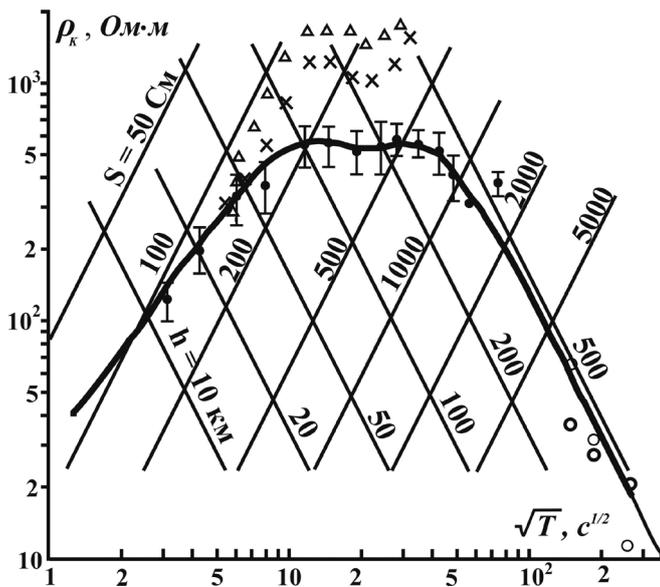


Рис. 1

Кривые кажущегося сопротивления ρ_k в трех пунктах Горного Крыма на расстоянии 1–2 км от Черного моря: в Алуште [9], в районе поселков Приветное и Морское [8].

Жирные точки с вертикальными отрезками – средние значения определений ρ_k и их погрешностей в Алуште.

Жирная кривая – четырехслойная 1D-модель, подобранная командой А.Н.Тихонова для интерпретации данных Алушты.

Крестики и треугольники представляют ρ_k , полученные в пунктах Приветное и Морское, соответственно.

Прямые под углом +67 и -67 градусов являются асимптотами S и h, соответственно

получена в пунктах Приветное и Морское, а также в нескольких других пунктах Горного Крыма (по данным производственных организаций Укргеологии). Эти данные указывают на стабильные значения S1 в региональном плане и на возможность рассматривать Горный Крым как квазидвумерную структуру с осью параллельной береговой линии.

Летом 1979 г. вдоль международного геотраверса № 5 на участке Тарханкут – Керчь объединением «Укргеофизика» были выполнены глубинные магнитотеллурические зондирования почти в 100 пунктах. Использовались цифровые станции ЦЭС-2. Длительность записи на всех пунктах была не менее суток, на каждом третьем пункте – трое суток. Обработка была выполнена по программам Л.И. Томчакова, основанным на узкополосной цифровой фильтрации с оценкой неопределенности по результатам обработки нескольких участков записи. Большинство кривых получено в диапазоне периодов 15–5000 с, но на 50-километровом участке профиля, пересекающем электрифицированную железную дорогу, кривые не были получены из-за помех (методика синхронной обработки данных еще не применялась). Результаты исследований вдоль геотраверса № 5 на участке Тарханкут – Керчь описаны в статье [7] и будут кратко изложены ниже.

Геoeлектрический разрез Индоло-Кубанского прогиба, Некрасовско-Тимашевской ступени и Каркинитско-Северо-Крымской впадины может быть представлен как шестислойный с соотношением сопротивлений $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 > \rho_5 \ll \rho_6$. Первый

слой – четвертичные отложения с сопротивлением 2–20 Ом·м, мощностью от 0 до нескольких десятков метров; второй слой – карбонатные отложения неогена $\rho = 5–50$ Ом·м, мощность – первые сотни метров; третий слой – проводящие глинистые отложения палеогена и верхов верхнего мела, $\rho = 1–6$ Ом·м, мощностью от сотен метров до 3–4 км (север Керченского полуострова); четвертый слой – карбонатные отложения верхнего мела, $\rho = 10–40$ Ом·м, мощностью – несколько сотен метров; пятый слой – терригенные отложения верхнего и нижнего мела, $\rho = 1–20$ Ом·м, мощность местами 1 км; шестой слой – опорный горизонт высокого сопротивления (более 100 Ом·м), представленный доломовыми и докембрийскими породами.

В пределах Каламитско-Крымского поднятия наиболее проводящий третий слой выклинивается, плохо проводящие второй и четвертый слои сливаются в один и геoeлектрический разрез сводится к четырехслойному. Следует отметить, что удельное сопротивление плохо проводящих второго и четвертого слоев не очень высокое (≈ 10 Ом·м), поэтому не следует ожидать сильных эффектов экранирования.

На восходящей ветви большинства кривых МТЗ наблюдается небольшой перегиб, который может быть вызван проводящим слоем в литосфере. Повторяемость перегиба на большинстве кривых в определенных зонах и отсутствие его вне этих зон указывают на его геологическую природу. Была выполнена интерпретация нескольких эффективных кривых в рамках горизонтально-слоистых моделей. Там, где перегиб имеет плавную форму, удалось подобрать модели, обеспечивающие удовлетворительное совпадение модельных и наблюдаемых данных [7].

В течение длительного периода изучение глубинного строения Крымского полуострова методами электроразведки проводили Крымская геоефизическая экспедиция, трест «Днепрогеофизика» и Институт геоефизики НАН Украины [6].

В период 2007–2013 гг. экспериментальные исследования были выполнены Институтом геоефизики НАН Украины и УкрНИМИ (отдел электромагнитных методов исследований под руководством Е.М. Шеремета). Их результатом явилось предположение о наличии нескольких протяженных субвертикальных проводящих структур или единого вытянутого проводника, простирающегося в субширотном направлении в центральной части Скифской плиты [2].

Непосредственно в районе профиля Ялта – Новоселовка необходимо отметить исследования под руководством В.К. Хмелевского, направленные на изучение глубинного геолого-структурного строения юго-западной части Главной гряды Крымских гор [10]. В 1959–1965 гг. в ходе строительства Ялтинского гидротоннеля длиной 7,2 км силами кафедры геоефизики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова проводились работы методом дипольных электрических зондирований (ДЭЗ) с максимальными расстояниями между приемной и питающей линиями до 20 км (рис. 2).

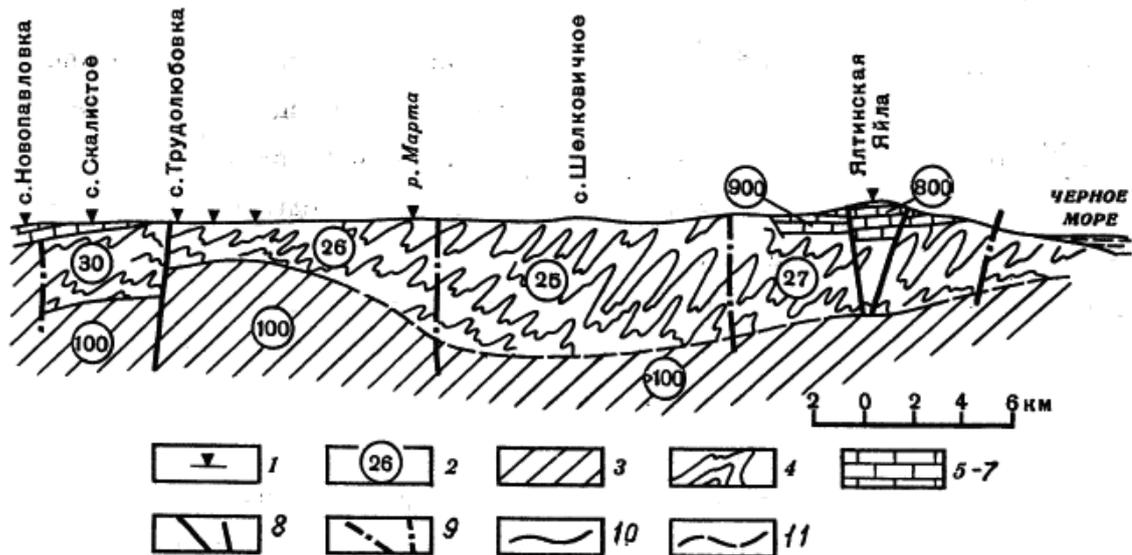


Рис. 2

Геозлектрический разрез через Качинский антиклинорий и синклиний Юго-Западного Крыма [10].

Условные обозначения: 1 – центры двусторонних дипольных электрических зондирований; 2 – удельное электрическое сопротивление пород (Ом·м); 3 – палеозойский фундамент; 4 – терригенные флишевые отложения Таврической серии; 5–7 – отложения средней и верхней юры и мела; 8, 9 – крутые тектонические нарушения (8 – достоверные, 9 – предполагаемые); 10–11 – границы геозлектрических горизонтов (10 – достоверные, 11 – предполагаемые)

По [10] в районе Главной гряды Крымских гор в результате работ методами электроразведки было установлено, что палеозойский фундамент залегает на глубине 4200–4700 м, мощность отложений Таврической серии равна 3000–3300 м. В районе реки Бельбек мощность пород Таврической серии составляет около 2 км. Были получены значения удельных электрических сопротивлений (УЭС) для пород Таврической серии (25–30 Ом·м), карбонатных мезозойских отложений (> 400 Ом·м). Обнаружено несколько тектонических нарушений.

Особенности полевых наблюдений

В феврале 2016 г. компанией «Северо-Запад» в Крыму были выполнены экспериментальные работы методом МТЗ по профилю Ялта – Новоселовка в объеме 30 физических точек (рис. 3).

Профиль начинается у п. Гаспра на юге, далее тянется на север через плато Ай-Петри, п. Соколиное, п. Верхоречье, п. Научный, п. Прохладное (где находится геологическая база МГУ), п. Скалистое, п. Почтовое, проходит 11 км северо-западнее г. Симферополя и заканчивается у п. Новоселовка.

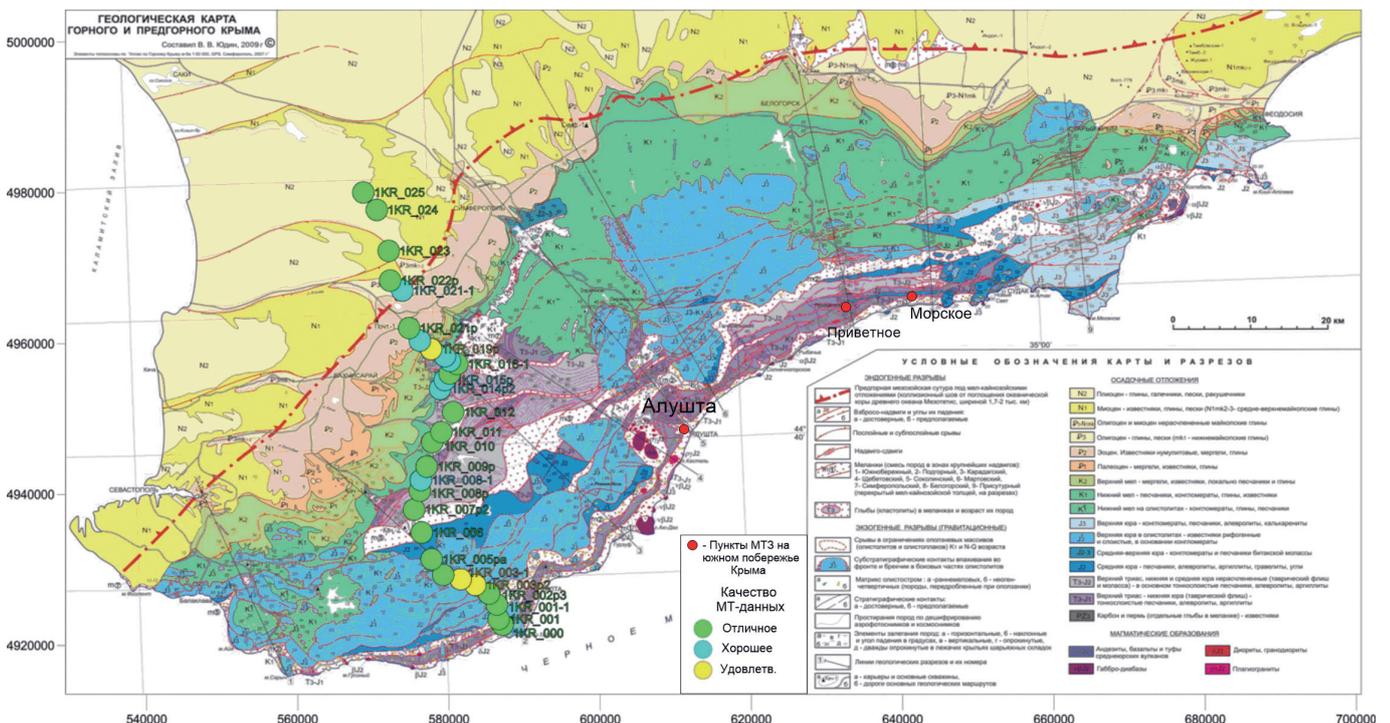


Рис. 3

Положение пунктов зондирования профиля Ялта – Новоселовка. Геологическая карта Горного и Предгорного Крыма [11]

Магнитотеллурические зондирования выполнялись с использованием двух видов аппаратуры: канадской компании Phoenix Geophysics – пятиканальных измерительных станций MTU-5A, позволяющих регистрировать электрические и магнитные компоненты поля, а также измерителей MARY-PRO российской компании «Северо-Запад», регистрировавших только электрические компоненты МТ-поля. Вариации магнитного поля измерялись с помощью индукционных датчиков MTC-50 (Phoenix Geophysics, Канада) и IMS-0010 (совместная разработка «Северо-Запад» и VEGA Geophysics, Россия).

Профильные электроразведочные работы методом МТЗ проводились по профилю общей протяженностью 70 км с шагом 1–3 км.

Перед началом полевых работ и по их окончании для всех станций проводилась параллельная запись на идентичность работы каналов и датчиков.

Исследуемый регион работ характеризуется высоким уровнем промышленных помех. Существенные помехи создавали крупные населенные пункты и линии электропередачи. В Республике Крым в период проведения работ периодически прекращалось электроснабжение городов и поселков, что способствовало улучшению качества материала, записанного в эти часы, но отключение происходило только в утренние и вечерние часы и на не очень продолжительное время. На плато Ай-Петри находится астрофизическая обсерватория, которая в радиусе 4 км создавала сильную помеху на средних частотах.

Для подавления некоррелируемых шумов и повышения качества МТ-данных регистрация проводилась в синхронном режиме одновременно несколькими станциями.

Одной из особенностей данных работ является использование удаленной более чем на 1000 км базовой станции наряду с базовыми станциями, расположенными в районе работ. Подобная методика неоднократно применялась при работе в районах с промышленной помехой [3].

Обработка проводилась в «синхронном» режиме с данными базовой станции, находящейся в Калужской области, на геофизической базе МГУ в д. Александровке. В местах с явным присутствием промышленной помехи можно рекомендовать обработку с удаленной базовой станцией. Напротив, в местах относительно «спокойных» обработка с удаленной базовой станцией давала результаты хуже, чем обработка с местной базой.

Обработка данных МТЗ и анализ полученных МТ-откликов

Обработка МТ-данных велась с помощью программы SSMT2000, разработанной компанией Phoenix Geophysics, и следующих программ компании «Северо-Запад».

Для оценки передаточных операторов использовалась программа ЕРІКІТ. Ручная отбраковка некондиционных оценок и итоговое сглаживающее осреднение проводились в программе МТ-Corrector. В результате двухточечной (Remote

Reference) обработки для большинства из 30 точек зондирований получены кондиционные частотные зависимости импеданса в интервале периодов 0,003–2000 с. Типичные кривые кажущегося сопротивления профиля Ялта – Новоселовка приведены на рисунке 4.

Для последующей 2D-инверсии компоненты тензора импеданса были вычислены в системе координат, повернутой на угол -45° . Выбор угла поворота МТ-данных обусловлен простиранием береговой линии и геологических структур и ориентировкой эллипсов фазового тензора [12] на большей части пунктов зондирования.

На рисунке 5 представлены карты фазовых полярных диаграмм по профилю Ялта – Новоселовка на разных периодах. По формам диаграмм видно, что на высоких периодах ($T = 100$ с) исследуемая среда близка к двумерной с локальными трехмерными неоднородностями. Большинство диаграмм близки по форме к правильным овалам. При этом несколько диаграмм на юге профиля имеют формы покосившихся овалов (присутствуют локальные трехмерные неоднородности). На низких периодах ($T = 0,1$ с) диаграммы становятся менее вытянутыми, а некоторые (в северной части профиля) обретают форму окружности, что характеризует ситуацию в верхней части частотных разрезов как близкую к одномерной.

Для лучшего разделения локальных и региональных эффектов, а также уточнения ориентации глубинных региональных структур был использован метод фазового тензора (метод Кэлдуэлла – Бибби – Брауна), описанный в [12]. Практически на всем протяжении профиля значения $|\text{skewCBB}| < 5^\circ$ (рис. 6), учитывая погрешность фазовых измерений (5°), можно сделать вывод о том, что исследуемая среда – двумерная с локальными трехмерными искажениями.

Интерпретация

Инверсии выполнялись в программе R. Mackie [13], интегрированной в программный пакет МТ-2DTools (ООО «Северо-Запад»). Инверсия проводилась по компонентам тензора импеданса по методике, предложенной М.Н. Бердичевским [1].

В основе интерпретации лежит двухуровневый алгоритм. На первом этапе проводилась отдельная инверсия данных ТЕ- и ТМ-мод. На втором – бимодальная инверсия. ТЕ-мода дает информацию о глубинных проводящих зонах, а ТМ-мода – об осадочном чехле и интегральном сопротивлении верхней коры или литосферы. Бимодальная инверсия позволяет добиться минимальных невязок по обеим модам. На всех этапах инверсии выполнялись с учетом рельефа и влияния берегового эффекта.

В качестве стартовой модели для отдельных ТМ- и ТЕ-инверсий использовалось однородное полупространство ($U_{ЭС} = 10$ Ом·м) с добавлением слоя водной толщи ($U_{ЭС} 0,3$ Ом·м) со стороны Южного берега Крыма.

Стартовой моделью для второго уровня инверсии являлся результат инверсии данных ТЕ-моды ввиду

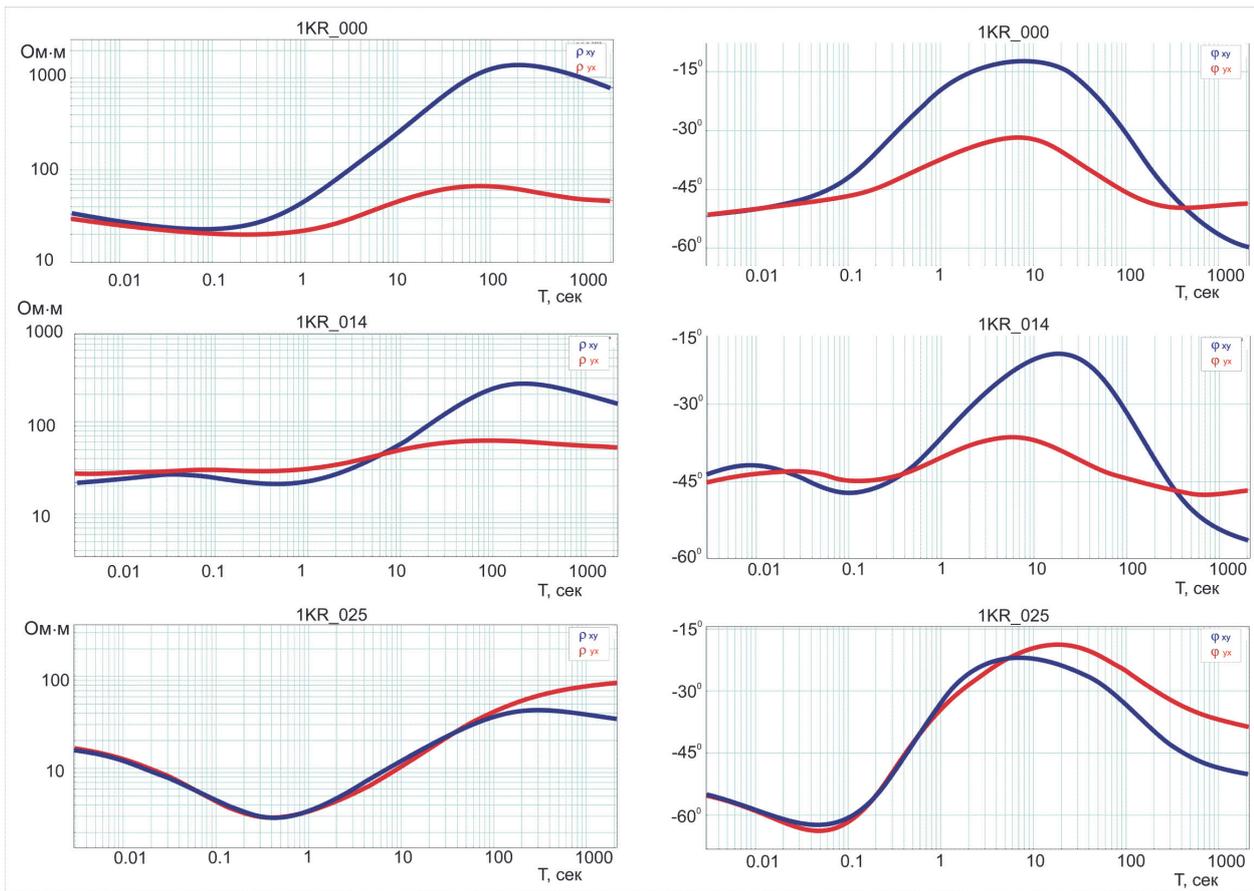
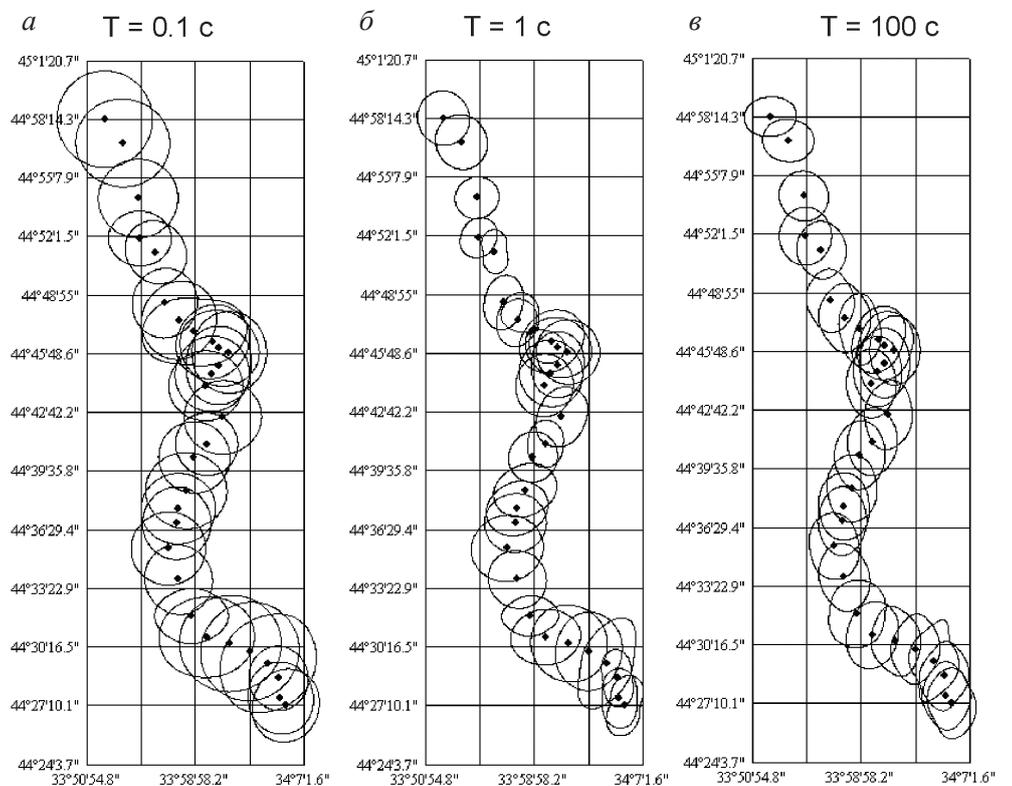


Рис. 4
Типичные кривые кажущегося сопротивления (слева) и фазы импеданса (справа) на профиле Ялта - Новоселовка

Рис. 5
Карты фазовых полярных диаграмм по профилю Ялта - Новоселовка на периодах: а - 0,1 с, б - 1 с, в - 100 с



Масштаб фазовых диаграмм:
— 75°

ее большей чувствительности к глубинным структурам. На обоих этапах интерпретации вычисления велись параллельно для моделей с сеткой разбиения модели разной густоты и различных параметров сглаживания.

Невязка по кривым кажущегося сопротивления продольной компоненты не превышает 5%, за исключением отрезка профиля в районе Главной гряды, где невязка составила около 15%, по фазовым

кривым – 5°. Поперечная компонента характеризуется относительно меньшими невязками как по кривым кажущегося сопротивления (не более 2,4%), так и по фазовым (не более 2,5°). Результат инверсии представлен на рисунках 7 и 8.

На полученной модели выделяется три геоэлектрических комплекса: проводящие осадочные отложения мезокайнозойского возраста ($\rho < 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), породы флишевой Таврической

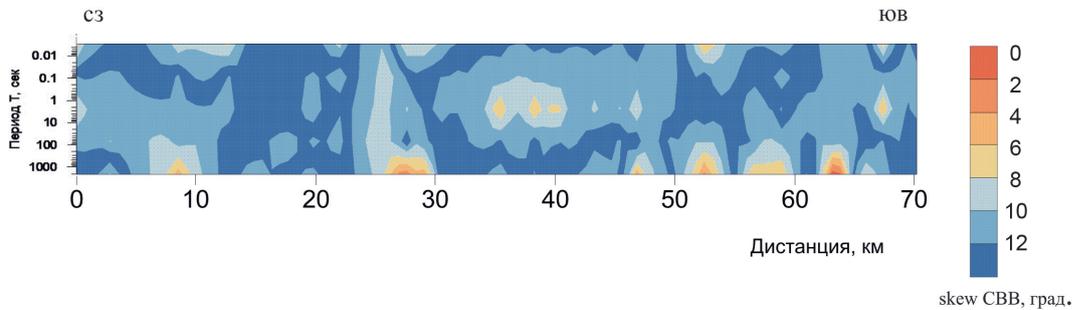


Рис. 6 Псевдоразрез параметра региональной асимметрии среды Кэздзулла – Бибби – Брауна skewCBB по [12]

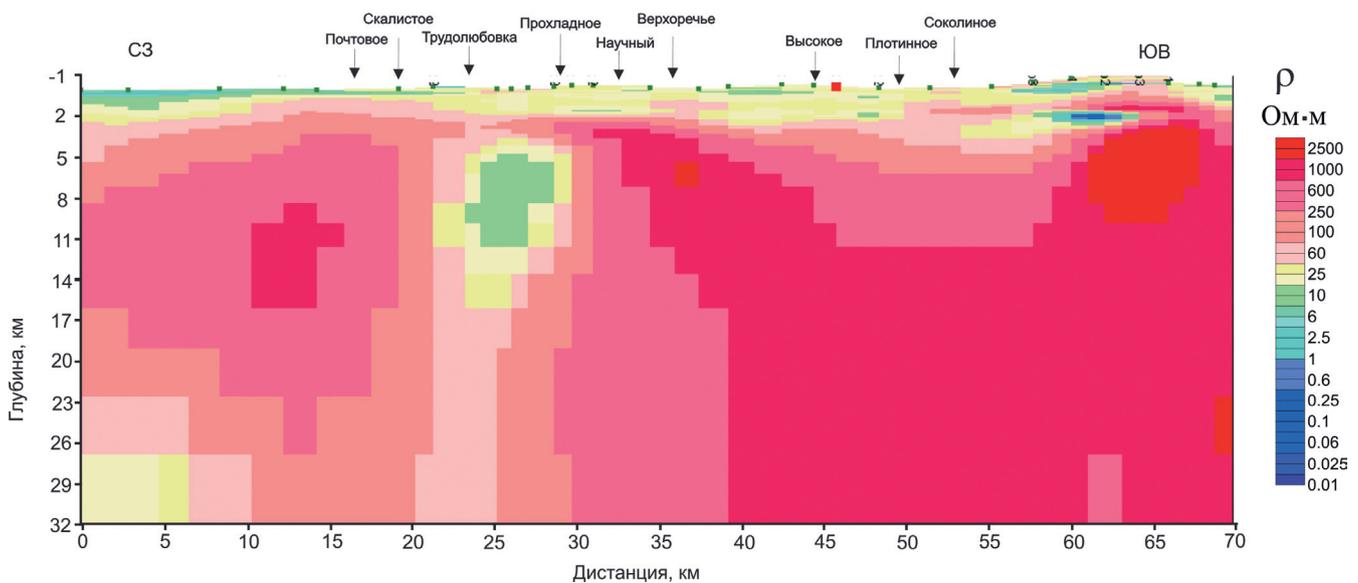


Рис. 7 Результат бимодальной инверсии МТ-данных по профилю Ялта – Новоселовка

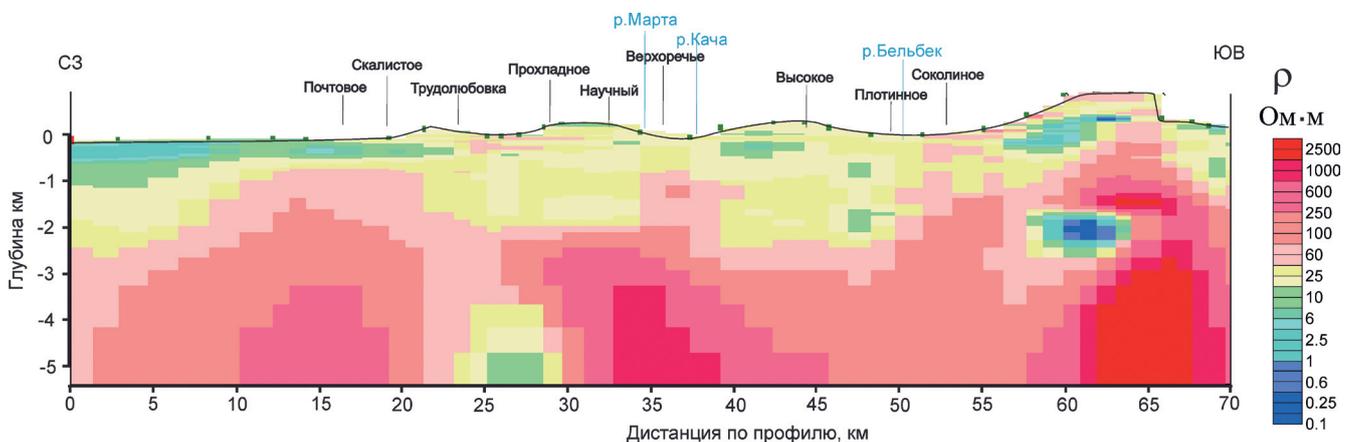


Рис. 8 Результат бимодальной инверсии МТ-данных по профилю Ялта – Новоселовка (верхние 5 км)

кой серии (УЭС 25–30 Ом·м), предположительно метаморфизованные породы кристаллического фундамента (УЭС > 100 Ом·м).

В фундаменте, на отрезке профиля 15–30 км, выделяется субвертикальная структура с пониженными значениями УЭС около 50–100 Ом·м и проводящим объектом в верхней части метаморфического фундамента, которому соответствуют аномально низкие для пород фундамента значения УЭС 10–30 Ом·м. Так проявляется в геоэлектрическом разрезе Предгорный разлом. Проводящая зона в верхней части разреза может быть обусловлена наличием флюидонасыщенной зоны трещиноватости.

Другая аномалия повышенной проводимости выделяется в юго-восточной части профиля на отрезке 60–64 км. По одной из версий такое низкое УЭС в данной области могут создавать водонасыщенные осадочные отложения, по другой – наличие гидротермально измененных пород на глубинах 2–3 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье представлены результаты МТ-зондирований в Горном Крыму по профилю Ялта – Новоселовка. В результате работ получен геоэлектрический разрез до глубин 30 км. Несмотря на большое количество источников промышленных помех в районе работ, благодаря выбранной методике удалось получить МТ-данные высокого качества. Методика измерений с использованием удаленной более чем на 1000 км базовой станции показала свою состоятельность.

На геоэлектрическом разрезе по профилю Ялта – Новоселовка обнаружены две аномалии электропроводности: глубинная коровая, связанная с Предгорным разломом, и залегающая на относительно небольшой глубине (2–3 км) под Главной грядой Крымских гор.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам компании «Северо-Запад» Е.Д. Алексановой, Д.В. Яковлеву, А.В. Соловьевой, С.Н. Курочкину, принимавшим участие в полевых работах и обработке МТ-данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
2. Бурахович Т.К., Кушнир А.Н., Николаев И.Ю., Шеремет Е.М., Ширков Б.И. Результаты экспериментальных электромагнитных исследований Крымского региона // Геоф. журн. 2016. № 2. С. 57–78.
3. Епишкин Д.В., Яковлев А.Г. О границах применимости метода удаленной базы при магнитотеллурических зондированиях // Геофизика. 2016. № 3. С. 55–64.
4. Муратов М.В. Краткий геологический очерк Крымского полуострова. М., 1960. 207 с.
5. Плахотный Л.Г., Сиденко О.Г., Чир Н.М., Абашинов А.А. О глубинной тектонике предгорий Крымских гор и происхождении экзотических известняковых глыб // Геол. журн. 1988. № 1. С. 120–127.
6. Рокитянский И.И. Исследования аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 279 с.

7. Рокитянский И.И., Креймер С.Г. Магнитотеллурические зондирования на профиле Тарханкут – Керчь в Крыму // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1984. № 2. С. 115–125.

8. Ткачев Г.Н., Свириденко И.А. Некоторые результаты ГМТЗ в Крыму. В кн.: Электромагнитные исследования. Киев: Наук. думка, 1978. С. 92–97.

9. Тихонов А.Н., Липская Н.В., Денискин Н.А., Никифорова Н.Н., Ломакина З.Д. Об электромагнитном зондировании глубоких слоев Земли // Доклады АН СССР. 1961. Т. 140. № 3. С. 587–590.

10. Хмелевской В.К., Кузьмина Э.Н. Глубинное строение Горного Крыма по данным электроразведки // Очерки геологии Крыма. Вып. 1. М.: изд. геол. ф-та МГУ, 1997. С. 177–186.

11. Юдин В.В. Геодинамика Крыма. Монография. Симферополь: ДИАЙ-ПИ, 2011. 336 с, 330 библ., 128 рис.

12. Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 2004, 158, p. 457–469.

13. Rodi W., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 2001, 66, p. 174–187.

REFERENCES

1. Berdichevsky MN, Dmitriev VI. Models and Methods of Magnetotellurics. Moscow: Scientific World, 2009. 680 p. (in Russian).
2. Burakhovich TK, Kushnir AM, Nikolayev IYu, Shirkov YeM. Results of experimental electromagnetic studies of the Crimean region. *Geophysical Journal*. 2016; (2): 57–78 (in Russian).
3. Epishkin DV, Yakovlev AG. Limitations of remote reference method in magnetotelluric investigation. *Geophysics*. 2016; (3): 55–64 (in Russian).
4. Muratov MV. A short essay on the geological structure of the Crimean Peninsula. Moscow, 1960. 207 p. (in Russian).
5. Plahotny LG, Sidenko OG, Chir NM, Abashin AA. About the deep tectonics of the foothills of the Crimean Mountains and the origin of exotic limestone blocks. *Geological Journal*. 1988; (1): 120–127 (in Russian).
6. Rokityanskiy II. Studies conductivity anomalies by magnetovariational profiling. Kiev: Naukova Dumka, 1975, p. 279 (in Russian).
7. Rokityanskiy II, Kreymmer SG. Magnetotelluric soundings on profile Tarkhankut-Kerch in Crimea. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth*. 1984; (2): 115–125 (in Russian).
8. Tkachev GN, Sviridenco IA. Some results of DMS in Crimea. In: *Electromagnetic research*. Kiev: Naukova Dumka, 1978, p. 92–97 (in Russian).
9. Tikhonov AN, Lipskaya NV, Deniskin NA, Nikiforova NN, Lomakina ZD. About electromagnetic sounding of deep layers of the Earth. *Lectures of the Academy of Sciences of the USSR*. 1961; 140(3): 587–590 (in Russian).
10. Khmelevskoy VK, Kuz'mina EN. Deep structure of the Mountainous Crimea according to electrical survey. *Essays on the geology of Crimea*, 1997, № 1, p. 177–186 (in Russian).
11. Yudin VV. Geodynamics of the Crimea. Monograph. Sympheropol, DIP Publ., 2011. 336 p.: il (in Russian).
12. Caldwell TG, Bibby HM, Brown C. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*. 2004; (158): 457–469.
13. Rodi W, Mackie RL. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*. 2001; (66): 174–187.

Положительная рецензия от 31.01.2019

Решение редколлегии о публикации от 15.02.2019

ОБ АВТОРАХ



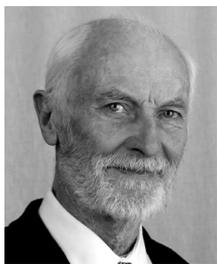
ДЕСЯТОВ
Дмитрий Олегович

Аспирант кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени Ломоносова. Научные интересы – интерпретация данных магнитотеллурических зондирований.



ПУШКАРЕВ
Павел Юрьевич

Окончил геологический факультет МГУ в 1998 г. Профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени Ломоносова, доктор геолого-минералогических наук. Научные интересы – электромагнитные зондирования земли с использованием естественных и искусственных источников. Автор более 50 научных статей.



РОКИТЯНСКИЙ
Игорь Иванович

Окончил физический факультет ЛГУ в 1953 г. Старший научный сотрудник Института геофизики имени С.И. Субботина НАН Украины, профессор, доктор физико-математических наук. Крупный специалист в области изучения глубинной электропроводности земной коры и мантии. Автор более 200 научных работ.



ЯКОВЛЕВ
Андрей Георгиевич

Окончил геологический факультет МГУ в 1981 г. Доцент кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени Ломоносова, кандидат физико-математических наук. Научные интересы – совершенствование аппарата интерпретации и обработки низкочастотных электромагнитных зондирований. Автор более 90 научных работ.