

Результаты экспериментальных электромагнитных исследований Крымского региона

© Т. К. Бурахович¹, А. Н. Кушнир¹, И. Ю. Николаев²,
Е. М. Шеремет², Б. И. Ширков¹, 2016

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Институт геохимии, минералогии и рудообразования НАН Украины,
Киев, Украина

Поступила 18 декабря 2015 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

У результаті сучасних експериментальних спостережень методами магнітотелуричного зондування (МТЗ) і магнітоваріаційного профілювання (МВП), проведених у 2007—2013 рр. по 9 профілях (48 пунктів), що перетинають різні геологічні структури Кримського регіону, отримано просторово-часову картину розподілу геомагнітних варіацій та електричного поля на поверхні Землі, за якою можна оцінити величину електропровідності і геоелектричну структуру розрізу по вертикалі і горизонталі. Обробку виконано за допомогою сучасної програмної системи PRC-MTMV (автор Ів. М. Варенцов), що забезпечує спільне перешкодозахищене оцінювання імпедансу, типеру, горизонтального МВ-відгуку за синхронними МТ/МВ-записами.

Основний результат якісної інтерпретації геоелектричних досліджень — виявлення ділянок високої електропровідності як у земній корі, так і у верхній мантії Криму, які визначаються різною провідністю і глибиною залягання, конфігурацією і по-різному характеризують різні геологічні структури. Субвертикальні електропровідні зони часто збігаються з розломними структурами різного порядку, більшість таких об'єктів приурочені до шовних зон між різними тектонічними елементами — Східноєвропейською платформою і Скіфською плитою, Скіфською плитою і Гірським Кримом, Північнокерченською і Південнокерченською зонами. Це може свідчити про високу проникність для глибинних флюїдів шовних зон у процесі їх утворення.

Деякі аномалії високої електропровідності добре описані в літературі та є відомими, наприклад, унікальна Тарханкутська аномалія (розташована не тільки на однойменному півострові Криму, а й у північно-західній частині Чорного моря). Її параметри деталізовано й уточнено, припускається багаторівнева глибинна будова регіону. Складні за структурою аномалії електропровідності передбачають у Сиваському грабені та Керченському півострові.

Якісна інтерпретація експериментальних даних методів МТЗ і МВП дає неузгоджене уявлення про глибинний розподіл електропровідності Кримського регіону, однак комбінація цих методів дає змогу набагато точніше й адекватніше щодо спостережених експериментальних даних побудувати модель розподілу питомого опору в рамках тривимірного середовища.

Ключові слова: експериментальні електромагнітні дослідження, аномалії електропровідності, земна кора та верхня мантія, Кримський регіон.

Введение. Исследования электропроводности пород земной коры и верхней мантии территории Крыма необходимо отнести к разряду фундаментальных научных задач.

Породообразующие минералы, в основном силикаты, при температурах ниже солидуса в земной коре имеют очень высокое сопротивление, в то время как естественные электрические токи концентрируются в областях низкого сопротивления. Эти проводящие области могут быть представлены твердыми, как, например, графит и сульфиды или оксиды метал-

лов, и жидкими фазами, особенно рассолами и расплавом. Сопротивление пород коры с увеличением температуры уменьшается гораздо слабее, чем при появлении твердой или жидкой фазы проводников. Но при этом необходимо, чтобы проводящие включения были связаны, и в случае, если высокая проводимость определяется наличием флюидов, это может быть косвенным указанием путей миграции жидкой фазы.

В мантии более простой минеральный состав ограничивает круг потенциальных при-

чин объяснения появления областей высокой электропроводности. Таким природным фактором могут быть флюиды, которые, возможно, состоят из расплавленной фазы, включающей воду и CO_2 [Tarits, 1986].

Изучение кимберлитовых и карбонатных магматических формаций показывает, что на глубинах 150—200 км, возможно, не существует какого-либо достаточного количества флюидов, но небольшая их доля может привести к уменьшению температуры плавления, т. е. энергетического порога плавления пород. Известно, что начиная с глубин 300—400 км электропроводность заметно возрастает. На этих глубинах минералы мантии Земли при высоком давлении претерпевают перестройку [Omura, 1991]. Здесь при α — γ -переходе происходит скачок электропроводности, который составляет один порядок и не зависит от содержания железа.

Таким образом, сопротивление вещества мантии зависит от фазового состояния и определяется только наличием флюида и расплава [Watson, Brenan, 1987]. Согласно последним исследованиям [Semenov et al., 1996; Neal, 1998; Semenov, Jozwiak, 1999], сейсмические границы на глубинах 440 и 660 км также проявляются в электрической проводимости.

Методы магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и магнитовариационного профилирования (МВП), основанные на изучении естественного электромагнитного поля Земли ионосферно-магнитосферного происхождения, предоставляют прямую информацию о проводниках в земной коре и верхней мантии.

Цель настоящей статьи — анализ современных экспериментальных МТ/МВ-исследований Крымского региона, выявление на качественном уровне аномалий высокой электропроводности. Параметры этих аномалий используются для построения трехмерной глубинной модели и последующего анализа ее связи с районами очагов генерации углеводородов и местами поступления их в верхние части земной коры, а также с очагами глубинных землетрясений.

Глубинное строение тектоносферы Крыма по данным предыдущих геоэлектрических исследований. В течение длительного периода изучение глубинного строения Крымского полуострова геоэлектрическими методами проводили Крымская геофизическая экспедиция (данные И. А. Свириденко, 1978 г.) и трест «Днепрогеофизика» (данные С. Кремера, 1980 г., А. И. Ингерова, 1989—1993 гг.), а также

Институт геофизики АН Украины [Рокитянский, 1975; Ткачев, Свириденко, 1978; Кулик, Бурахович, 1984; Бурьянов и др., 1985] (рис. 1).

На основе одномерной интерпретации выявлена слабопроводящая (до 800 См) астеносфера с глубиной залегания верхней кромки около 100 км [Бурьянов и др., 1985].

Экспериментальными исследованиями [Кулик, Бурахович, 1984] на Тарханкутском полуострове обнаружена глубинная аномалия повышенной электропроводности. Ее двумерная модель [Бурахович и др., 1987] включает два объекта на глубинах 14 и 60 км, их суммарная продольная проводимость (S) оценена в 6000 См.

По результатам квази-3D пленочного моделирования [Кулик, Бурахович, 1999] аномального поведения поля геомагнитных вариаций на периодах (T) 150 и 2000 с наиболее проводящие участки ($S=5000$ См) расположены в основном в пределах акватории Черного моря, на территории Каркинитско-Северо-Крымского прогиба и Альминской впадины. От Тарханкутского полуострова аномалия электропроводности субширотно простирается на глубине 5 км, затем изменяет направление на северо-западное и частично трассируется вдоль узкого гребневидного опускания подошвы коры. В этой части на профиле ГСЗ прослежен глубинный разлом такого же простираения [Соллогуб, Чекунов, 1975; Юровский, 1997]. В Горном Крыму аномальная область с S 1000 См на глубине 2 км размещена в зоне сгущения изолиний плотности эпицентров землетрясений [Юровский, 1997]. Керченская аномальная зона проявляется на глубинах 2 и 5 км с S 2500 и 5000 См соответственно. Географически она совпадает с положением грязевых вулканов Керченско-Таманского региона, возможно контролируется тектоническими нарушениями, корневая система которых залегает на глубине 5—7 км [Тихоненков, 1997].

Необходимо отметить, что при квази-3D моделировании аномального поля геомагнитных вариаций достаточно хорошо определяется пространственное расположение аномалий. Вместе с тем глубина залегания проводников, их мощность устанавливаются со смещением, поскольку явление скин-эффекта в высокоомной вмещающей среде незначительно и глубина проводника может влиять, в основном, только на пространственные градиенты типперов при удалении от границ объектов. При редкой сети наблюдений ошибки могут быть существенными.

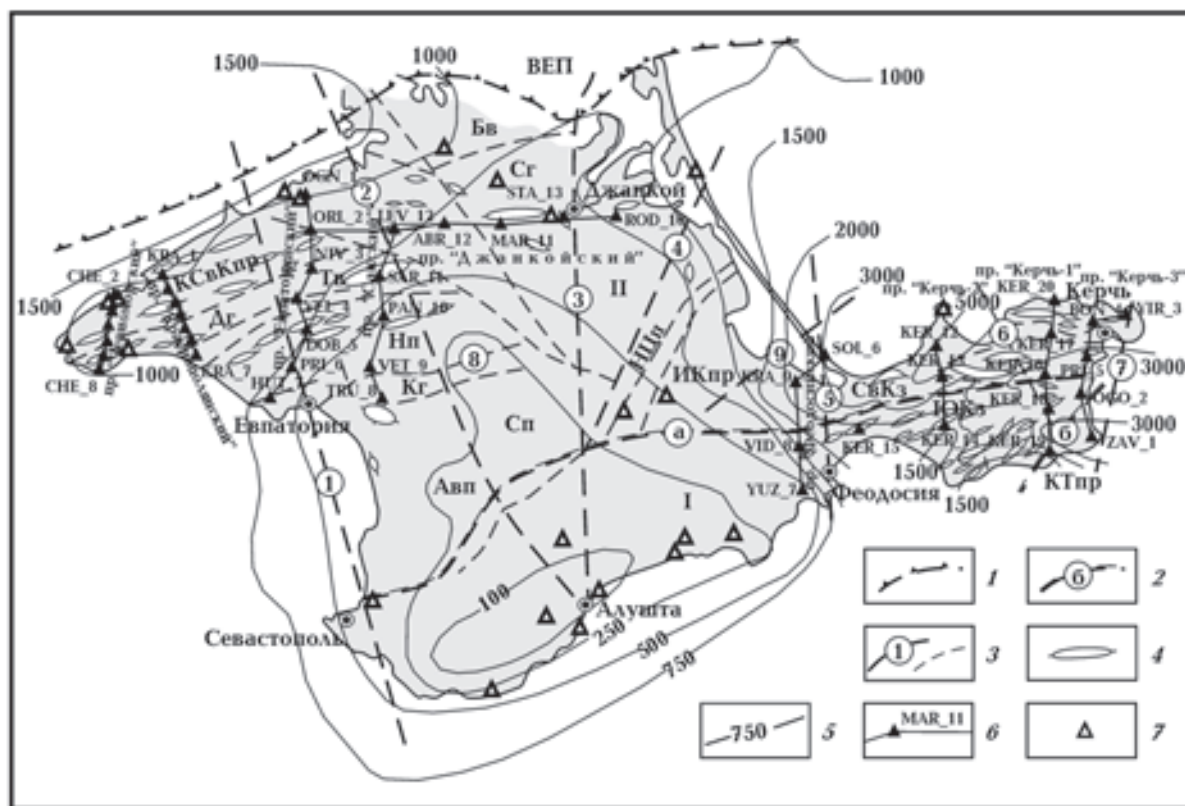


Рис. 1. Обобщение материалов МТЗ и МВП Крымского региона на схеме тектонического строения Украины по данным [Тектоническая..., 1988]: 1 — граница разновозрастных Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и Скифской плиты (СП); 2 — разломные структуры I порядка (а — разделяет Горный Крым и СП; б — Правдинская); 3 — разломные структуры II порядка (1 — Евпаторийско-Скадовская; 2 — Салгирско-Октябрьская; 3 — Чонгарская; 4 — Мелитопольско-Новоцарицкая; 5 — Корсакско-Феодосийская; 6 — Горнистаевская; 7 — Керченско-Чкаловская; 8 — Донузлавская; 9 — Новотитаровская); 4 — локальные поднятия; 5 — изолинии суммарной продольной проводимости поверхностных отложений (S_{oc}), См; 6 — пункты МТЗ и МВП по современным данным 2007—2013 гг. на линии профилей: Черноморский, Краснополянская, Керчь-1, -2, -3, Евпаторийский, Сакский, Джанкойский, Феодосийский; 7 — пункты МТЗ и МПП по данным [Рокитянский, 1975; Кулик, Бурахович, 1984; Бурьянов и др., 1985]. Тектонические структуры 1-го порядка: 1 — складчатое сооружение Горного Крыма, II — СП. Региональные тектонические структуры: Авп — Альминская впадина; Тв — Тарханкутский вал; Бв — Балашовский выступ; СвКз — Северо-Керченская зона; ЮКз — Южно-Керченская зона; прогибы: КТпр — Керченско-Таманский, ИКпр — Индоло-Кубанский, КСвКпр — Каркинитско-Северо-Крымский; поднятия: Нп — Новоселовское, Сп — Симферопольское, НЦп — Новоцарицкое; грабены: Дг — Донузлавский, Кг — Калиновский, Сг — Сивашский.

Современные экспериментальные исследования. Экспериментальные МТ/МВ работы выполнены Институтом геофизики НАН Украины (в 34 пунктах) и УкрНИМИ (отдел электромагнитных методов исследований под руководством Е. М. Шеремета в 14 пунктах) в 2007—2013 г. (рис. 1). Наблюдения проводились с помощью длиннопериодных цифровых станций серии LEMU-417 с феррозондовыми магнитометрами [Пристай и др., 2014]. Главные преимущества станций — очень низкий временной дрейф (± 5 нТл/год) и высокая точность измерений (0,02 % в течение 2 лет), особенно при глубинных зондированиях земной коры и верхней мантии.

Наблюдения в полевых точках велись от 10 ч до 7 сут, расстояние между пунктами вдоль профиля в среднем составляло от 1,5 до 5—10 км.

В подавляющем большинстве пунктов наблюдений получены кондиционные 5-компонентные записи электромагнитного поля, синхронные с еще одной полевой точкой и одним базисным МВ-пунктом обсерватории Дымер [Орлюк и др., 2014]. Материалы такого уровня удовлетворяют требованиям к применению процедур синхронного оценивания передаточных операторов МТ/МВ полей программного комплекса PRC—MTMV [Varentsov, 2007; Варенцов, 2013]. Такой под-

ход помог эффективно подавлять локальные и региональные коррелирующие помехи, что, в свою очередь, позволило получить надежные оценки импеданса для $T=10\div 10000$ с, типперы для 50—4000 с и горизонтальный магнитный тензор $[M]$ от 10 до 10^4 с. Последний отражает изменение геоэлектрической среды между базисной и полевой точками. Наиболее ясное представление о строении в окрестности полевой точки можно получить только в том случае, когда базисная точка расположена в горизонтально-однородной области, которая характеризуется нормальным магнитным полем. Иногда используют несколько базисных пунктов [Алексанова и др., 2013]. К сожалению, обсерватория Дымер расположена в неоднородном в геоэлектрическом смысле районе, т. е. хотя S_{oc} составляет около 100 См, ее резкое изменение от малых значений на Украинском щите до высоких в пределах рядом расположенной хорошо проводящей с поверхности структуры Днепровско-Донецкой впадины существенно влияет на поведение МТ-поля. Кроме того, базисный пункт Дымер расположен в аномальной зоне (Днепровская аномалия электропроводности в земной коре и верхней мантии [Гордиенко и др., 2004]). Таким образом, эффекты неоднородностей обсерватории Дымер должны накладывать искажения на эффекты неоднородностей в окрестностях полевых точек.

Обработка экспериментальных данных проходила в два этапа. Первый этап — препроцессинг временных рядов, полученных станциями на каждом пункте наблюдений, т. е. прореживание данных с целью отбраковки различных импульсных помех, связанных с предупусковой автокалибровкой станций, а также с различного рода помехами в оперативной близости от станции. Второй этап — непосредственная обработка оптимизированного ряда для построения амплитудных и фазовых значений импеданса, кривых кажущегося сопротивления для меридионального (ρ_{xy}) и широтного (ρ_{yx}) направлений. Основной проблемой при обработке полученных данных может быть существенная дисперсия амплитудных и фазовых значений импеданса и кажущегося сопротивления на одной из станций. Для решения этой проблемы полученные результаты нормировали на данные базовых магнитовариационных станций (нормировка методом удаленной базы), что статистически привело к уменьшению дисперсии значений и сглаживанию кривых.

Хотя обработка PRC-MTMV позволяет получать диаграммы передающих операторов МТ-поля, визуализация в виде наборов псевдоразрезов наиболее информативных компонент функций отклика дает возможность наглядного отображения результатов, особенно при выделении в пространстве локальных зон высокой электропроводности на профиле исследований.

Выполнен анализ псевдоразрезов МТ/МВ параметров: компонент реальной ReW и мнимой ImW частей типперов; главных компонент M_{xx} и M_{yy} тензора горизонтального аномального магнитного поля; кажущегося удельного электрического сопротивления (амплитудные ρ_k и фазовые φ кривые) для меридионального (ρ_{xy} ; φ_{xy}) и широтного (ρ_{yx} ; φ_{yx}) направлений вдоль профилей Евпаторийский и Феодосийский [Бурахович и др., 2015]. Результаты экспериментальных электромагнитных исследований вдоль профилей Евпаторийский и Сакский представлены в работе [Кушнir, 2016]. Первые результаты качественной интерпретации МТ/МВ исследований Крымского региона приведены в тезисах [Бурахович, Кушнir, 2015].

Анализ результатов экспериментальных исследований. Профиль Черноморский субмеридионально пересекает Каркинитско-Северо-Крымский прогиб в западной части Тарханкутского полуострова (рис. 1).

Индукционные типперы (вещественные ReW и мнимые ImW) во всех семи пунктах профиля для $T < 300$ с характеризуются юго-восточным направлением и величинами до 0,35 и 0,2 соответственно (рис. 2, а). С увеличением T до 1300 с направление ImW изменяется на северо-западное, его величина уменьшается почти в 3 раза по сравнению с величиной ReW . Именно в этом диапазоне частотная характеристика аномального магнитного поля достигает максимальных значений (0,5) и ориентирована на восток. Вблизи береговой линии сильный береговой эффект в бухтообразных геомагнитных вариациях отражается на величине и характерном направлении ReW в сторону материка. На больших T индукционные типперы характеризуются почти одинаковым значением (0,3) в большинстве пунктов и ориентацией ReW на северо-восток. Если анализ данных продлить на север (около 100 км) и использовать для интерпретации результаты эксперимента [Рокитянский и др., 2012] в пунктах наблюдения 8 и 5, то на качественном уровне можно предположить наличие проводящих структур не только на юго-западе (глубокозалегающих в

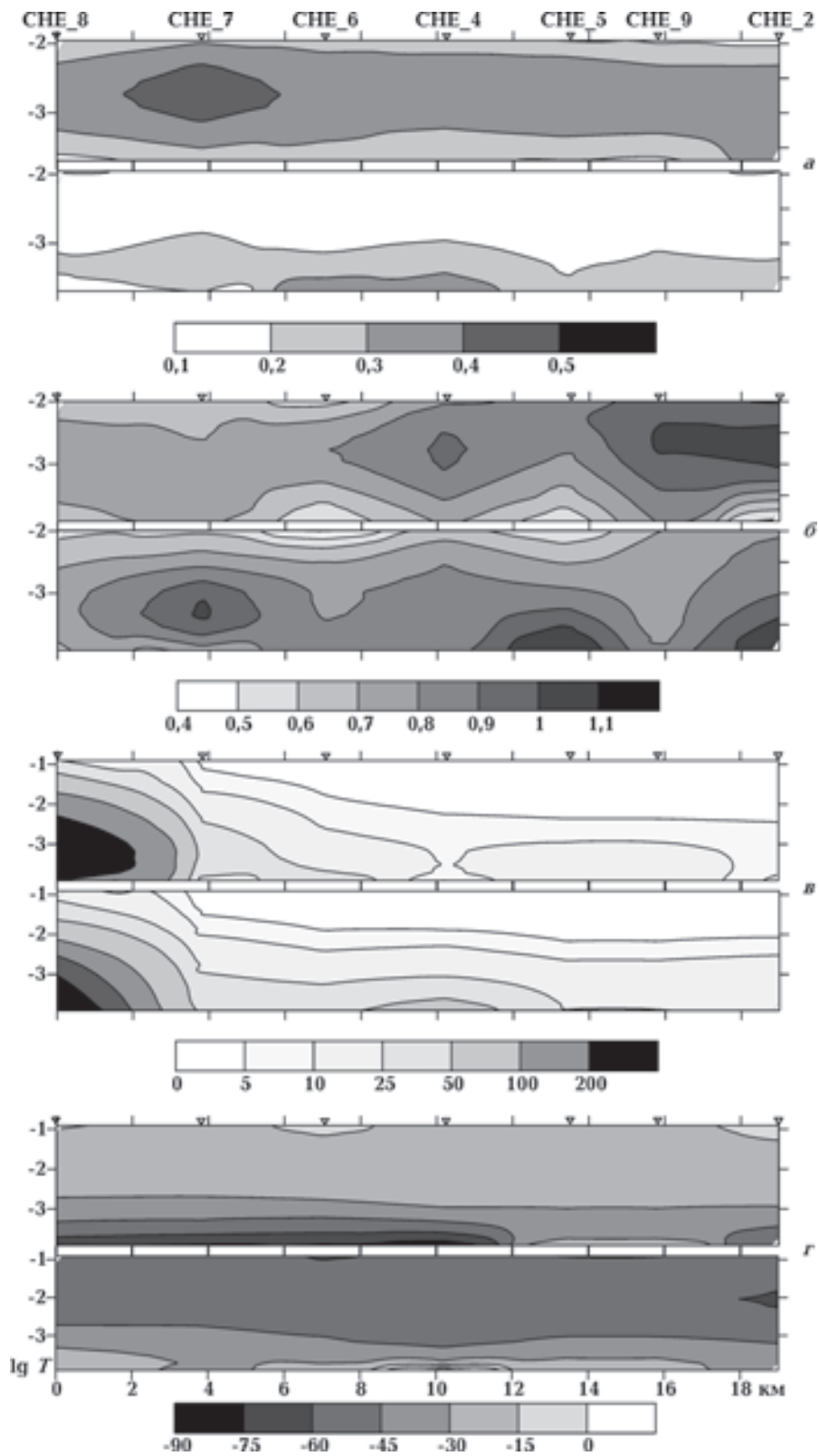


Рис. 2. Псевдоразрезы МТ/МВ параметров вдоль профиля Черноморский: *a* — значения компонент типперов $\text{Re}W$ и $\text{Im}W$; *б* — значения главных компонент M_{yy} и M_{xx} тензора горизонтального аномального поля; *в* — значения кажущегося сопротивления амплитудных кривых ρ_{xy} и ρ_{yx} ; *г* — фазовые φ_{xy} и φ_{yx} кривые импеданса. Вертикальная шкала — $\lg T$.

Черноморской впадине), но и на северо-западе (неглубоких в Каркинитском прогибе) субмеридионального простирания профиля. Об этом свидетельствуют пространственная ориентация и переходы через нулевые значения (в районе 5 и 30—50 км) вещественной меридиональной компоненты типперов.

Главные значения тензора горизонтального аномального магнитного поля M_{yy} и M_{xx} определяют размерность и ориентацию структуры [Schmucker, 1970; Бердичевский, Дмитриев, 2009]. По теории в случае горизонтально-слоистой Земли имеем $\|\mathbf{M}\| = \sqrt{2}$, зоны с $\|\mathbf{M}\| > \sqrt{2}$ соответствуют структурам пониженного, а $\|\mathbf{M}\| < \sqrt{2}$ — повышенного сопротивления. Анализируя значения M_{yy} и M_{xx} (рис. 2, б), можно отметить, что минимальные значения ReW соответствуют относительным максимумам над структурами пониженного сопротивления с учетом того, что базисный пункт Дымер расположен в аномальной зоне. На пунктах СНЕ-2, -5 и -7 максимумы этого параметра смещаются в область больших $T=5000$ с, что может быть вызвано увеличением глубины залегания верхней кромки проводящих объектов. Соотношение величин M_{yy} и M_{xx} несколько раз вдоль профиля изменяется и достигает максимума около 0,4 в пунктах СНЕ-7, -9 и -2 (3,8 и 16—19 км) для $T=1000$ с и 0,5 в пункте СНЕ-5 (13 км) для $T=5000$ с, что свидетельствует о резкой смене ориентации теллурических токов и сложном неоднородном строении недр. Аномальные значения M_{yy} и M_{xx} от 1,2 до 1,4 на $T=300\div 1000$ с зафиксированы на территории Причерноморской впадины в работе [Рокитянский и др., 2012].

Уменьшение уровня кривых ρ_k во всем частотном диапазоне вдоль профиля, скорее всего, соответствует увеличению S_{oc} от 1000 до 1500 См и объясняется гальваническими явлениями (рис. 2, в). С ростом T ρ_{yx} увеличивается от первых единиц до нескольких десятков омметров (до 200 Ом·м в пункте СНЕ-8), наблюдается расхождение кривых для разных поляризаций, при этом кривая ρ_{xy} практически не смещается по уровню ρ_k . Изменение соотношения между уровнем ρ_k кривых для разных поляризаций делит профиль (между пунктами СНЕ-6 и СНЕ-7) на две качественно разные зоны, что может быть вызвано существованием приповерхностного проводника субширотного простирания и соответствует данным комплексных типперов.

Фазовые кривые импеданса не подвержены гальваническим искажениям и информа-

ционны только с точки зрения относительного изменения удельного электрического сопротивления среды над однородным полупространством ($\varphi = -45^\circ$). В основном соблюдается амплитудно-фазовое соответствие кривых (рис. 2, г).

Профиль Краснополянский с юга на север пересекает геологические структуры западной части Крымского региона: Донузлавский грабен, Тарханкутский вал и Каркинитско-Северо-Крымский прогиб (см. рис. 1).

В 8 пунктах профиля поведение индукционных параметров повторяет ситуацию по профилю Черноморский. На $T < 300$ с направление ReW в основном юго-восточное, а величина составляет в среднем до 0,25 (рис. 3, а). Расхождения между ориентацией вещественных и мнимых типперов не превышает 90° , ImW направлен на восток и не превышает 0,1—0,2. Максимальное соотношение (более 3) их значений дает возможность определить максимум частотной характеристики, который соответствует диапазону T от 300 до 800 с, при этом направление ReW во всех пунктах юго-восточное. С увеличением $T > 1500$ с ориентация ImW изменяется на северо-западную, угол между вещественной и мнимой индукционными стрелками существенно превышает 90° , т. е. ориентация ReW — в основном на северо-восток, в то время как их величины становятся соизмеримыми и в среднем близки к 0,3. Очень большие значения типпера в пункте КРА-7 в области $T > 1000$ с, возможно, вызваны помехами при регистрации магнитных компонент. По поведению комплексных индукционных стрелок профиль качественно можно разделить на две части: южную (КРА-7—9, до 17 км) — менее проводящую и северную (КРА-3—1) — более проводящую, о чем свидетельствуют хаотичность направлений и малые значения — до 0,1 (реже 0,2) в пункте КРА-3.

Таким образом, по небольшой величине (около нуля) и пространственной ориентации северной компоненты ReW можно предположить продолжение на восток от профиля Черноморский двух проводящих структур субширотного простирания: 1) южнее пункта КРА-7; 2) между точкой профиля КРА-3 в Крыму и точкой 9 в Причерноморской впадине [Рокитянский и др., 2012].

К сожалению, параметры аномального магнитного поля в основном составляют 0,8—1,2 (рис. 3, б), расхождение между главными значениями M_{yy} и M_{xx} не превышает 0,2 (однако в пункте КРА-3 и севернее достигает 0,3 в диапазоне

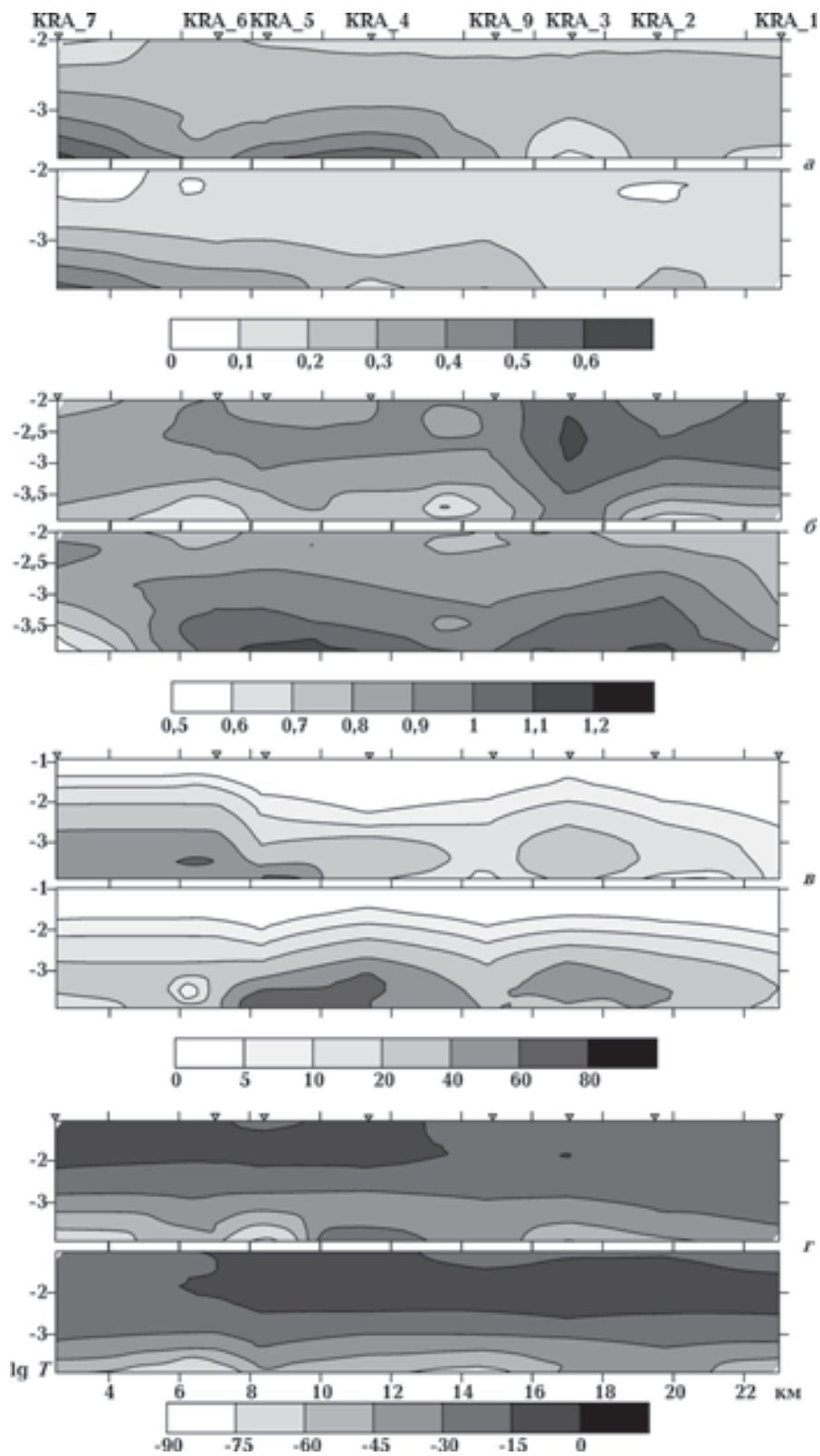


Рис. 3. Псевдоразрезы МТ/МВ параметров вдоль профиля Краснополянский: а—г — согласно условным обозначениям рис. 2.

периодов, соответствующих максимуму частотной характеристики индукционных типперов), при этом соотношение между ними резко изменяется вдоль профиля (особенно для $T > 1500$ с). Очевидно, что типперы имеют повышенную чувствительность к глубинным структурам и в данном случае значительно лучше позволяют разделять горизонтальные изменения глубинной электропроводности, чем горизонтальные магнитные тензоры M_{yy} и M_{xx} .

Кривые ρ_k описываются восходящей ветвью от первых единиц омметра до 100 Ом·м. На профиле во всем частотном диапазоне наблюдается уменьшение уровня кривых ρ_k (от 10—100 до менее 10 Ом·м) в северном направлении (рис. 3, в), что соответствует увеличению S_{oc} от 1000 до 1500 См (севернее пункта КРА-3). Изменение соотношения между уровнями кривых ρ_k для различных поляризаций в южной части профиля (первые 8 км, до и после пункта КРА-5) может быть вызвано наличием приповерхностного проводника субширотного простирания, что также соответствует данным комплексных типперов, как и на профиле Черноморский.

Фазы импеданса находятся в диапазоне от 0° до -75° (рис. 3, г). С увеличением $T > 1000$ с они плавно приближаются к -50° , где выходят на постоянный уровень, что свидетельствует об однородной электропроводящей среде.

Профиль Евпаторийский. Переход через нуль в меридиональной компоненте ReW регистрируется между крайней северной точкой профиля [Бурахович и др., 2015; Кушнир, 2016] и данными [Рокитянский и др., 2012] в районе Причерноморской впадины. Хорошо известно, что вещественные типперы направлены от повышенной к пониженной электропроводности и отражают ее распределение в геологической среде по горизонтали и вертикали.

Профиль Сакский. Если продлить на юг и на север и осреднить в 30-километровой зоне вдоль профиля данные предыдущих исследований [Рокитянский и др., 1975], то измерения типпера в основном отражают влияние (величина северной компоненты достигает 0,5), вызванное береговым эффектом в пункте (-60 км), затем следует несколько зон с нулевыми значениями северной и южной компонент (10—50 км), которые пространственно соответствуют существенно проводящим (до 1500 См) поверхностным структурам Северо-Крымского прогиба.

Необходимо отметить смещение в область меньших периодов ($T = 500 \div 800$ с) максимума

частотной характеристики аномального горизонтального магнитного поля по сравнению с данными ($T = 5000$ с в пункте СНЕ-5) на Черноморском профиле.

Профиль Джанкойский. Субширотный профиль, расположенный в северной части Скифской плиты (СП), в Сивашском грабене, восточнее Салгирско-Октябрьской разломной зоны (см. рис. 1), будем анализировать совместно с северными пикетами OGN-1/ORK-2 (-50 км) и LEV-12 (-18 км) профилями Евпаторийского и Сакского соответственно.

Скорее всего, пункт ABR-12 (0 км) располагается возле восточной границы аномалии высокой электропроводности, которая проявилась в МВ-параметрах западных субмеридиональных профилей. Все пункты с величинами менее 0,1—0,2 во всем частотном диапазоне и хаотичной ориентацией размещены в районе с $S_{oc} > 1000$ См, где изогипсы по поверхности верхнего мела достигают 1400 м. Комплексные индукционные стрелки в пункте MAR-11 (17 км) уже ориентированы на юго-восток от эпицентра проводящего включения, их величина близка к 0,5 и начинает уменьшаться на $T > 500$ с (рис. 4, а). Практически во всем диапазоне T ImW больше или равны ReW , угол расхождения между ними около 90° , что свидетельствует о сложном трехмерном строении геологической среды. На самых восточных пунктах профиля STA-13 и ROD-10 типперы, видимо, отражающие береговой эффект, направлены в основном на запад, коллинеарны, их величина (максимум 0,5—0,7 на $T = 300 \div 500$ с) уменьшается с увеличением T геомагнитных вариаций.

Соотношение уровня между характеристиками аномального горизонтального магнитного поля сохраняется вдоль всего профиля, $M_{xx} > M_{yy}$ на 0,2 и более, расхождение достигает максимума 0,4 для $T = 500 \div 800$ с в восточной части на пикетах более 15 км (рис. 4, б). Предполагается субширотная ориентация глубинного проводника. На данном профиле, как и на большинстве других, сохраняются относительно не аномальные значения параметров M_{xx} и M_{yy} при нормировке на пункт Дымер. А при использовании данных геомагнитного поля в пункте ROD-10 (48 км) в виде базисных нормировка синхронных наблюдений дает в пунктах STA-13 (30 км) и MAR-11 (17 км) значительную аномалию в параметре M_{yy} : более 2,0 на T до 30 с и более 1,6 на $T = 30 \div 40$ с, соответственно (рис. 5). На T более 50—100 с аномалия не проявляется, что может свидетель-

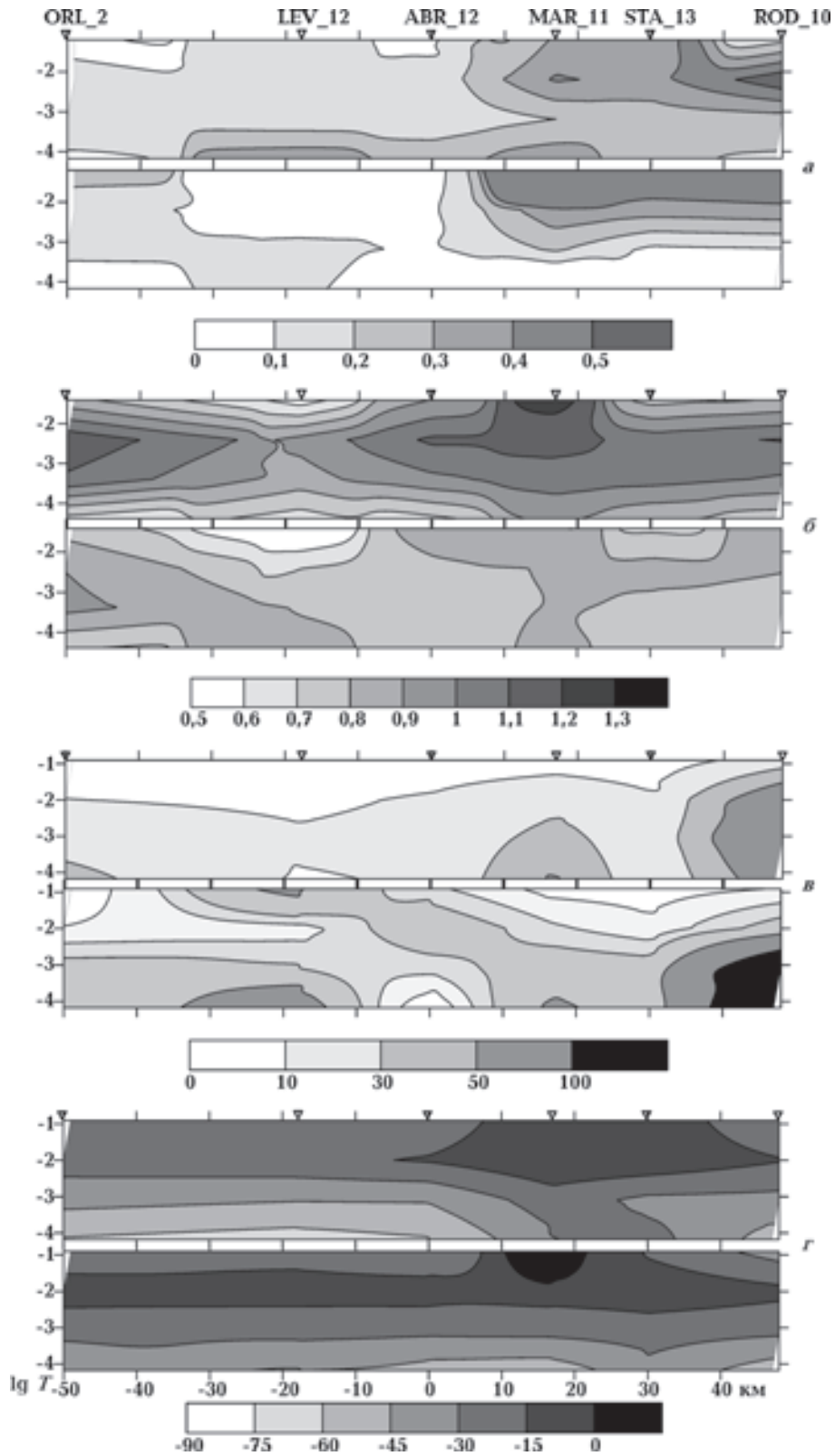


Рис. 4. Псевдоразрезы МТ/МВ параметров вдоль профиля Джанкойский: *a–г* — согласно условным обозначениям рис. 2.

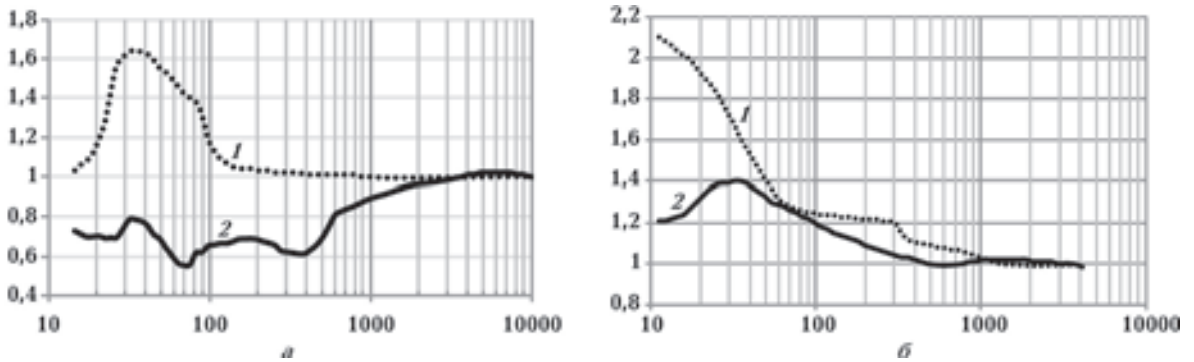


Рис. 5. Значения главных компонент M_{yy} (1) и M_{xx} (2) тензора горизонтального аномального поля в пунктах MAR-11 (а) и STA-13 (б) при нормировке на данные базисного пункта ROD-10.

ствовать о незначительной глубине залегания проводника (по результатам качественной интерпретации кривых ρ_k верхняя кромка залегает на глубине 2—3 км в ROD-10 и 3—5 км в STA-13), видимо, связанного с проводимостью осадочных отложений.

Значение S_{oc} сохраняется на уровне 1000 См на западе (до -50 км) и на востоке (после 30 км) профиля, но существенно изменяется от точки к точке, особенно в центральной части — от 1500 См (-20 км) до менее 500 См (17 км). Если до $T=300$ с значения кривых ρ_k (от 10 до 100 Ом·м) практически совпадают по направлениям измерительных линий и соответствуют изменению S_{oc} , то с увеличением T расхождение кривых ρ_{xy} и ρ_{yx} может достигать одного порядка (см. рис. 4, в). В центральной части профиля (от 0 до 30 км) при уменьшении значений S_{oc} ρ_k уменьшается на $T>1000$ с, что может быть вызвано существованием глубинного проводника с верхней кромкой 40—50 км.

Профиль Феодосийский. Восточная часть Крыма, а именно Керченский полуостров, также исследована геоэлектрическими методами по 4 субмеридиональным профилям. Профиль расположен западнее Корсакско-Феодосийского разлома по обе стороны от границы, разделяющей Скифскую плиту и Горный Крым, и состоит из 4 пикетов, самый северный из которых размещен на Арабатской Стрелке, а южный — на Черноморском побережье (см. рис. 1).

Как и во всех подобных случаях, трудно георетически объяснить величину типпера около и более единицы. Если такая величина наблюдается на коротких периодах, до $T<100\div 300$ с, то эти значения рассматривают как результат техногенных помех, т. е. низкое соотношение сигнал—шум не дает возможности получить надежные оценки МВ передаточных функций.

До $T=1500$ с ReW во всех пунктах профиля сохраняет направление на запад или юго-запад, а величина на южных пикетах (VID-8 до 0,7) больше, чем на северных (SOL-6 и KRA-9 до 0,4), максимум частотной характеристики соответствует периодам 500—1800 с (рис. 5, а). С увеличением T не только уменьшается величина ReW до 0,25, но и изменяется его ориентация на северо-западную. Во всем частотном диапазоне ImW по величине более чем в несколько раз меньше ReW наблюдается минимум до 0,2 на $500<T>1300$ с (особенно в северной части профиля), угол расхождения между реальными и мнимыми типперами составляет 90° и более, что свидетельствует о сложном трехмерном строении геологической среды по данным геоэлектрических исследований.

Расхождение между уровнями M_{xx} и M_{yy} (в среднем до 0,2) растет в северной части профиля и достигает максимума 0,4 для $T=500\div 800$ с на пикетах 28 км и более (рис. 5, б). Предполагается субширотная ориентация глубинного проводника. При нормировке синхронных наблюдений в пункте SOL-6 (Арабатская Стрелка, 41 км) на данные в пунктах VID-8 (11 км) и YUZ-7 (0 км) величина горизонтального аномального магнитного поля M_{xx} достигает 1,5—1,75 на $400<T<1100$ с, при этом расхождение между значениями главных компонент тензора превышает 0,6 (рис. 6), что подтверждает наличие проводника, предполагаемого по оценкам МВ передаточных функций.

Уменьшение уровня кривых ρ_{xy} (от 100 Ом·м в YUZ-7 до единиц омметра в KRA-9) соответствует изменению S_{oc} от 250 до 3000 См, в то время как форма и уровень широтных кривых (в среднем около 10 Ом·м) сохраняются вдоль всего профиля. В южной части профиля (до 30 км) соотношение между увеличением S_{oc} и практически слабо изменяющимся ρ_{yx} по

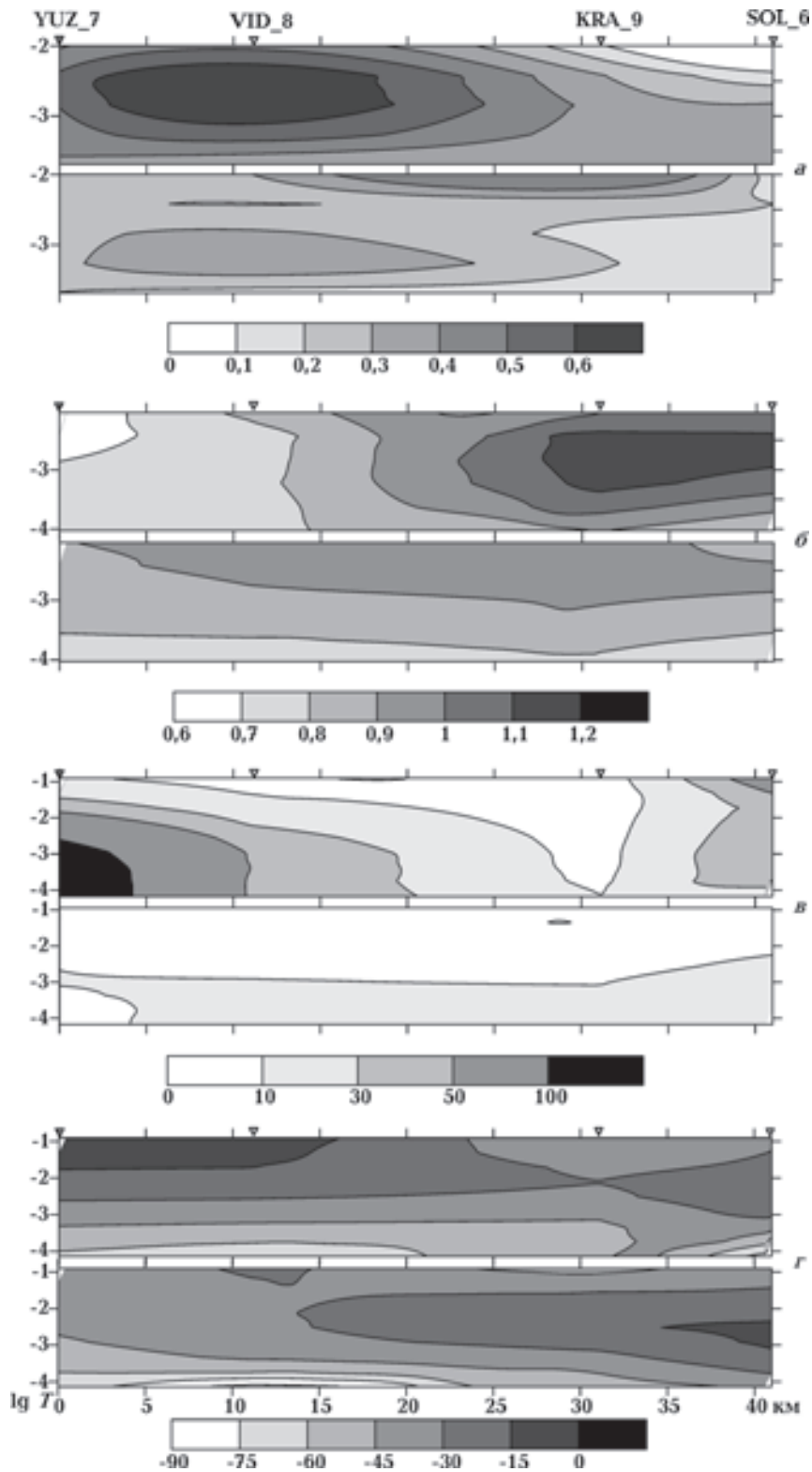


Рис. 6. Псевдоразрезы МТ/МВ параметров вдоль профиля Джанкойский: *a—г* — согласно условным обозначениям рис. 2.

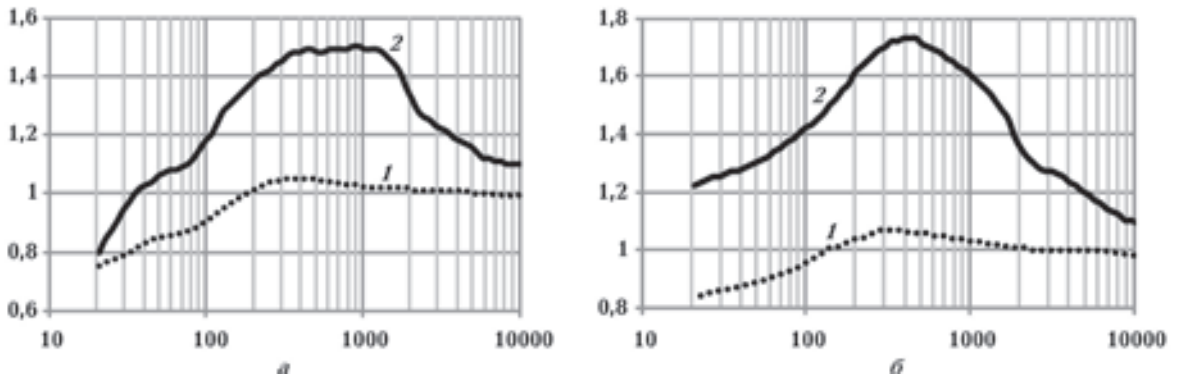


Рис. 7. Значения главных компонент M_{yy} (1) и M_{xx} (2) тензора горизонтального аномального поля в пункте SOL-6 при нормировке на данные пунктов VID-8 (а) и YUZ-7 (б).

профилю может быть вызвано существованием приповерхностного проводника с верхней кромкой на глубине 1—3 км. Комплексная качественная интерпретация электромагнитных передаточных операторов сводится к предположению о наличии глубинного (верхняя кромка 2—10 км) проводника на севере профиля, особенно в пункте SOL-6 (рис. 7). Наличие двух (или одной) проводящих аномалий, но с различной глубиной залегания верхней кромки вдоль профиля подтверждается и по данным фаз импеданса (рис. 6, г).

Профиль Керчь-2 проходит восточнее Керченского перевалка. На расстоянии около 30 км от предыдущего профиля субмеридионально расположены три пункта, а самый южный (KER-15), четвертый, размещен между профилями Феодосийский и Керчь-2.

С ростом периода ReW изменяет направление на пикете KER-15 (0 км) от западного для $T < 500$ с до северо-западного для $T > 500$ с, в центральной части профиля ориентация варьирует от южной до юго-западной для $T < 1500 \div 2000$ с, а на северных пунктах от восточной для $T < 200$ с до северо-западной для $T = 1000 \div 2500$ с и северной на больших T (рис. 8, а). Разворот типперов в северной компоненте ReW в диапазоне $T > 300$ с для пунктов наблюдения KER-12 и KER-13 (между 35—42 км) предполагает существование субширотной проводящей структуры, которая может быть пространственно связана с основным тектоническим швом между СП и складчатым сооружением Горного Крыма. Трудно определить максимум частотной характеристики, скорее всего, он приходится на $T = 800 \div 1800$ с (0,4), при этом величины ImW и ReW соизмеримы, угол между ними колеблется от точки к точке и равен около 90° . Величина типпера в пункте KER-12 очень мала (до 0,1) и

может быть вызвана значительными S_{oc} (около 5000 См) и мощностью осадочных отложений (до 9 км) Керченско-Таманского прогиба.

Уменьшение уровня значений кривых ρ_k с юга на север соответствует увеличению S_{oc} от 1000 до 4500 См (рис. 8, б). С увеличением T кривые для разных поляризации расходятся более чем на порядок (для KER-12 в южной части профиля), что может указывать на существование глубинных проводящих объектов. Качество экспериментального материала не позволило получить надежные данные по фазовым кривым импеданса (рис. 8, в).

Профиль Керчь-1 простирается субмеридионально восточнее Горностаевской зоны разломов на расстоянии 30 км от описанного выше профиля Керчь-2 (непосредственные измерения электромагнитного поля Земли в 10 пунктах вдоль этих двух профилей проводились И. Ю. Николаевым и Г. Н. Зайцевым в 2007 г.). Самый южный пункт KER-19 расположен в зоне пересечения разломных структур Горностаевской и Правдинской, а пункт KER-16 — над региональным швом между Восточно-Европейской платформой (ВЕП) и СП (см. рис. 1).

Кроме двух северных пунктов KER-17 и KER-20 (а также KER-12 и KER-13 профиля Керчь-2), где направление типперов в основном на юго-восток на коротких $T < 300$ с, на всех остальных пикетах во всем частотном диапазоне ReW ориентирован на запад. При этом можно предположить наличие проводящего глубинного объекта субширотного простираения между пикетами KER-18 и KER-19 (0—8 км) по развороту меридиональной компоненты типперов на T геомагнитных вариаций более 800 с. Максимум частотной характеристики около 0,3 можно отнести именно к этому периоду,

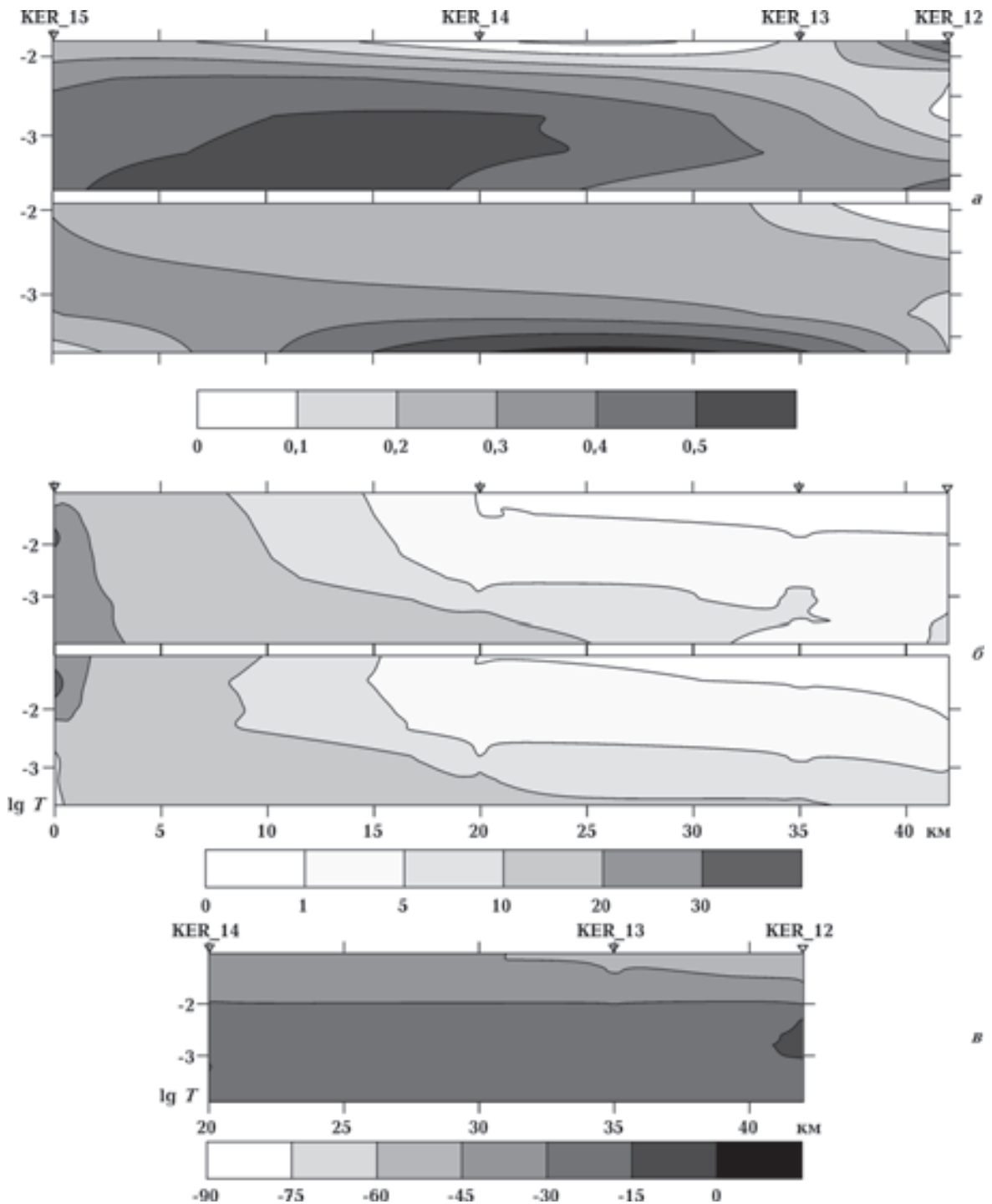


Рис. 8. Псевдоразрезы МТ/МВ параметров вдоль профиля Керчь-2: *a* — значения компонент типперов ReW и ImW ; *б* — значения кажущегося сопротивления амплитудных кривых ρ_{xy} и ρ_{yx} ; *в* — фазовые φ_{xy} , кривые импеданса. Вертикальная шкала, $-\lg T$.

хотя не на всех пикетах (особенно в северной части профиля) наблюдаются малые величины ImW (рис. 9, *a*). Для большинства T ImW около 0,2 соизмерим по величине с ReW (0,1—0,3), угол между ними изменяется от 0 до 90° с уве-

личением T . Вероятно, это вызвано значительной S_{oc} , которая изменяется от точки к точке от менее 2000 (в центральной части) до 5000 См, как на предыдущем профиле.

Средний уровень кривых ρ_k соответствует

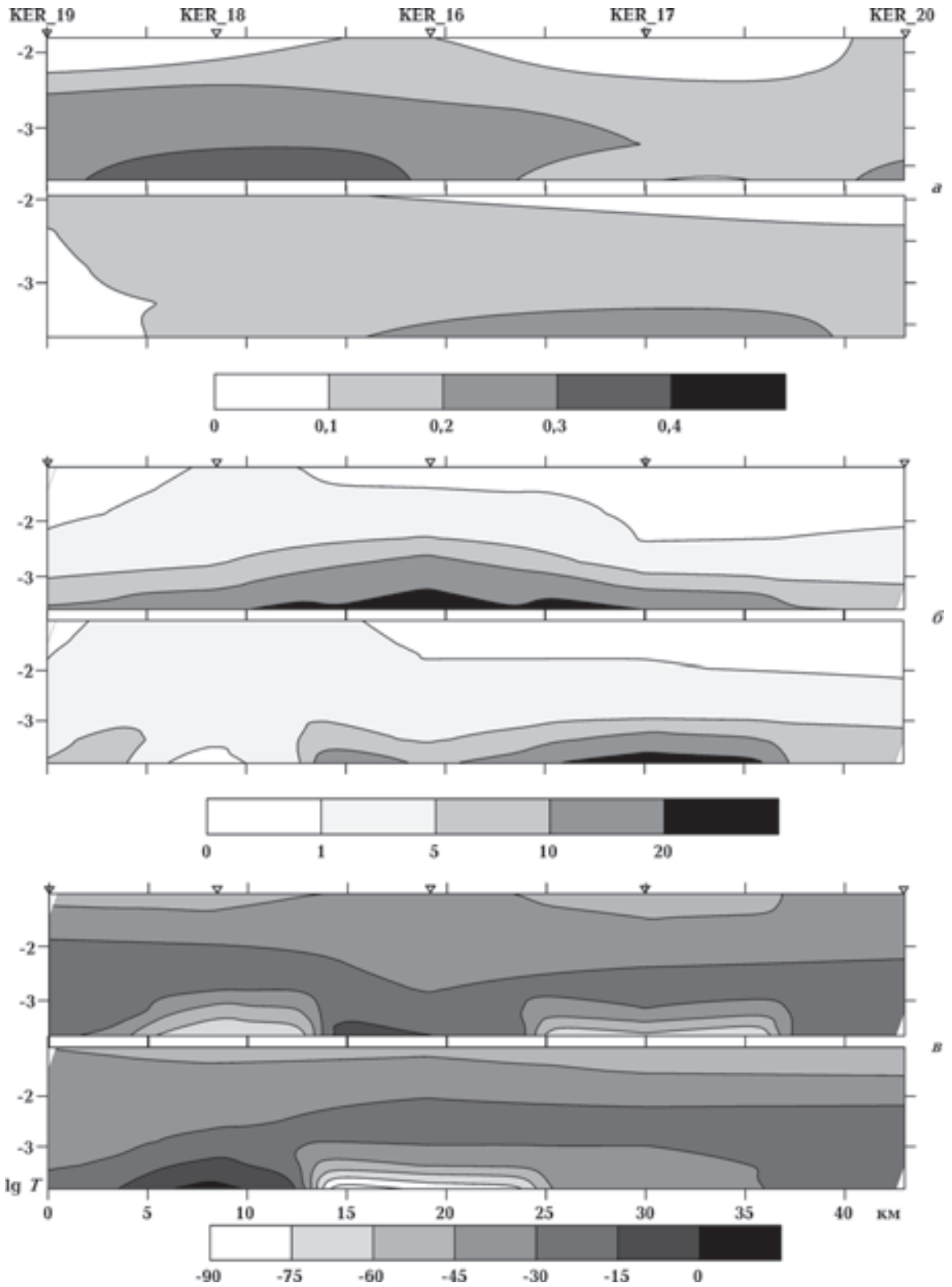


Рис. 9. Псевдоразрезы МТ/МВ параметров вдоль профиля Керчь-1: *а* — значения компонент типперов ReW и ImW ; *б* — значения кажущегося сопротивления амплитудных кривых ρ_{xy} и ρ_{yx} ; *в* — фазовые φ_{xy} и φ_{yx} кривые импеданса. Вертикальная шкала, $-\lg T$.

изменению S_{oc} . Расхождение кривых для разных поляризации в центральной части (пикет KER-16, 20 км) достигает почти одного порядка во всем диапазоне частот (рис. 9, б) и меньше половины порядка на юге (KER-19, 0 км), что возможно при наличии как глубинных, так и приповерхностных проводящих объектов. Фазовые кривые импеданса соответствуют амплитудным кривым (рис. 9, в).

Профиль Керчь-3 — самый восточный на Керченском полуострове, состоит из 5 субмеридионально расположенных пунктов. Южный пункт ZAV-1 зарегистрирован на территории Керченско-Таманского прогиба, ОГО-2 — над Правдинской разломной структурой, остальные пункты — в Северо-Керченской зоне, а самый северный — над Керченско-Чкаловской зоной разломов (см. рис. 1).

Комплексные индукционные стрелки характеризуются очень малыми значениями, в среднем до 0,1, особенно в северной части профиля, достигают 0,25 в его центральной части. Ориентация в основном на запад. Расхождение в меридиональной компоненте ReW наблюдается в центральной части профиля между пунктами BON-4 и PRI-5 (18—28 км) на $T > 300$ с (рис. 10, а). Для большинства T ImW меньше или соизмерим по величине с ReW , угол между ними чаще равен 0—45° или трудно определяется ввиду малости ImW . Такая картина поведения типперов может объясняться значительной проводимостью (до 5000 См) приповерхностных отложений.

Пожалуй, данный профиль — единственный, на котором главные значения горизонтального магнитного поля при нормировке на базовый пункт Дымер имеют аномальные величины более $\sqrt{2}$, а именно 1,38—1,52 на $T = 1000 \div 1500$ с, при этом соотношение уровней между M_{xx} и M_{yy} изменяется на пикете 10 км (ОГО-2), расхождение составляет около 0,2 (рис. 10, б). Предполагается субмеридиональная ориентация глубинного проводника.

В основном кривые ρ_k отображают высокую проводимость приповерхностных отложений S_{oc} — от 5000 до 3000 См, средний уровень около 10 Ом·м (рис. 10, в). Максимальное расхождение кривых для разных поляризации на коротких периодах наблюдается на пикете ZAV-1 (0 км), что может свидетельствовать о значительной приповерхностной неоднородности и вызываемых ею гальванических искажениях. Кроме того, при качественной интерпретации МТЗ в пункте ZAV-1 намечается проводник с верхней кромкой на глубинах

20—50, для остальной части профиля — от 2 до 10 км. Фазы импеданса отражают высокую проводимость ($\varphi_k > 45^\circ$) как с поверхности, так и на глубинах, соответствующих земной коре вдоль всего профиля (рис. 10, г).

Результаты МТ/МВ исследований Крымского региона. Таким образом, проанализировав полученные комплексные типперы в широком диапазоне T , можно предположить существование нескольких протяженных субвертикальных проводящих структур или границы единого вытянутого проводника, простирающегося в субширотном направлении в центральной части Скифской плиты (рис. 11).

Северная граница проходит по осевой части Северо-Крымского прогиба, через Михайловскую впадину и, вероятно, на западе связана с проводящей структурой Болградского глубинного разлома Преддобруджского прогиба. На восточном направлении, дойдя до Сивашского грабена, граница резко поворачивает на юго-восток и проходит вдоль Салгирско-Октябрьского разлома. В центральной части Крыма она изменяет направление на субширотное и прослеживается вдоль Донузлавского разлома до его пересечения с Чонгарским разломом. Далее, к сожалению, из-за отсутствия наблюдений в этом районе можно только предположить, что эта граница протягивается на Керченском полуострове или, наоборот, наблюдается ее разрыв, но экспериментальные исследования четко фиксируют проводящую структуру субширотного простирания, приуроченную к Северо-Крымскому шву между Северо-Керченской и Южно-Керченской зонами Керченского полуострова.

Южная граница субширотно проходит между Северо-Крымским прогибом и серией поднятий: Тарханкутским, Гамбурцева, Ильичевским, Новоселовским. Затем, как и северная граница, в центральной части Тарханкутского полуострова резко изменяет простирание на субмеридиональное и сечет как Новоселовское поднятие, так и Альминскую впадину. Еще раз резко изменяет направление на субширотное при пересечении с основным тектоническим швом между СП и складчатым сооружением Горного Крыма, следуя по нему на восток, и далее на Керченском полуострове соединяется (или нет) с северной границей проводника в единую разломную структуру по южной окраине Керченско-Таманского прогиба.

По качественной интерпретации данных МТЗ (рис. 11) можно выделить несколько объектов высокой электропроводности

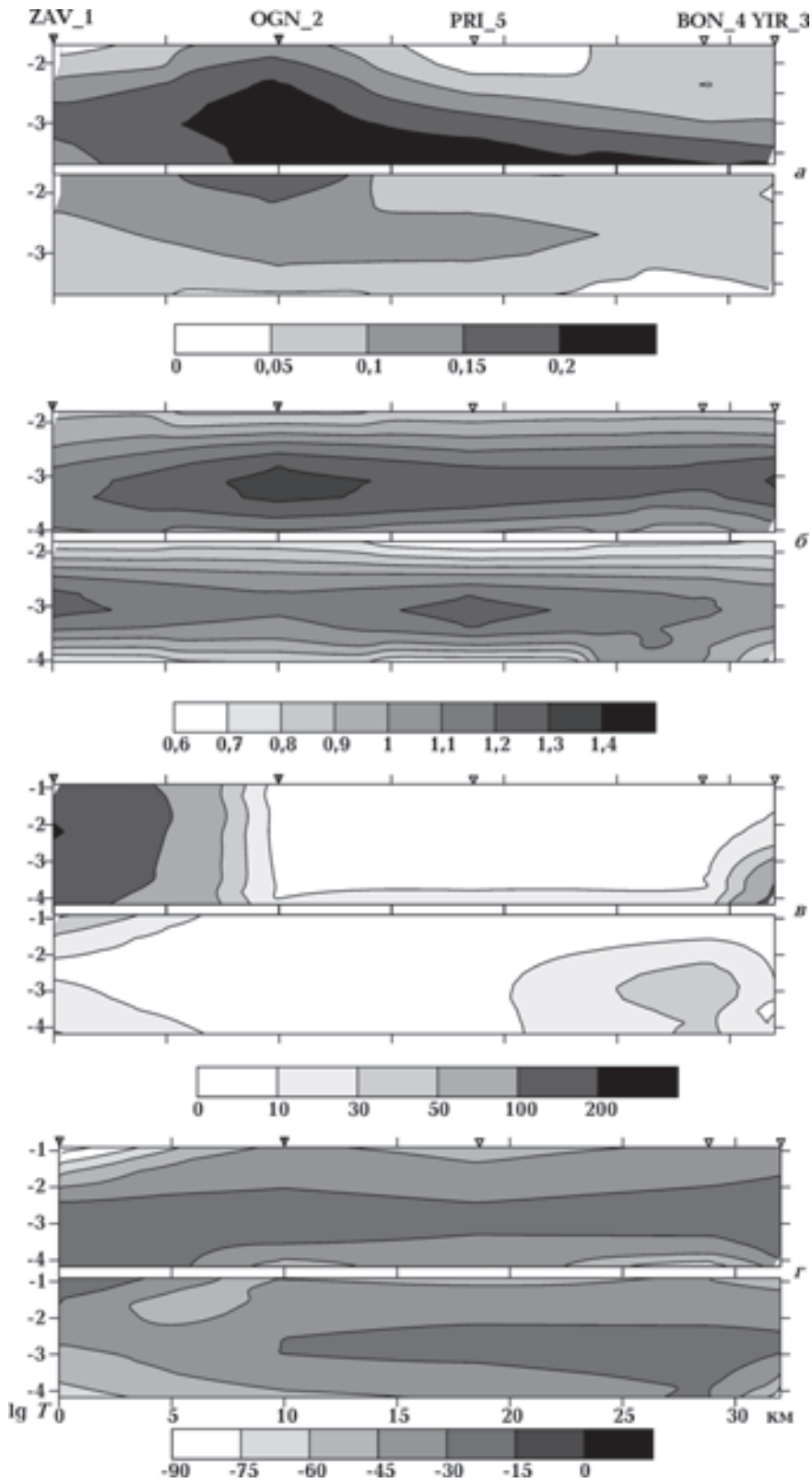


Рис. 10. Псевдорезрезы МТ/МВ параметров вдоль профиля Керчь-3: а–г — согласно условным обозначениям рис. 2.

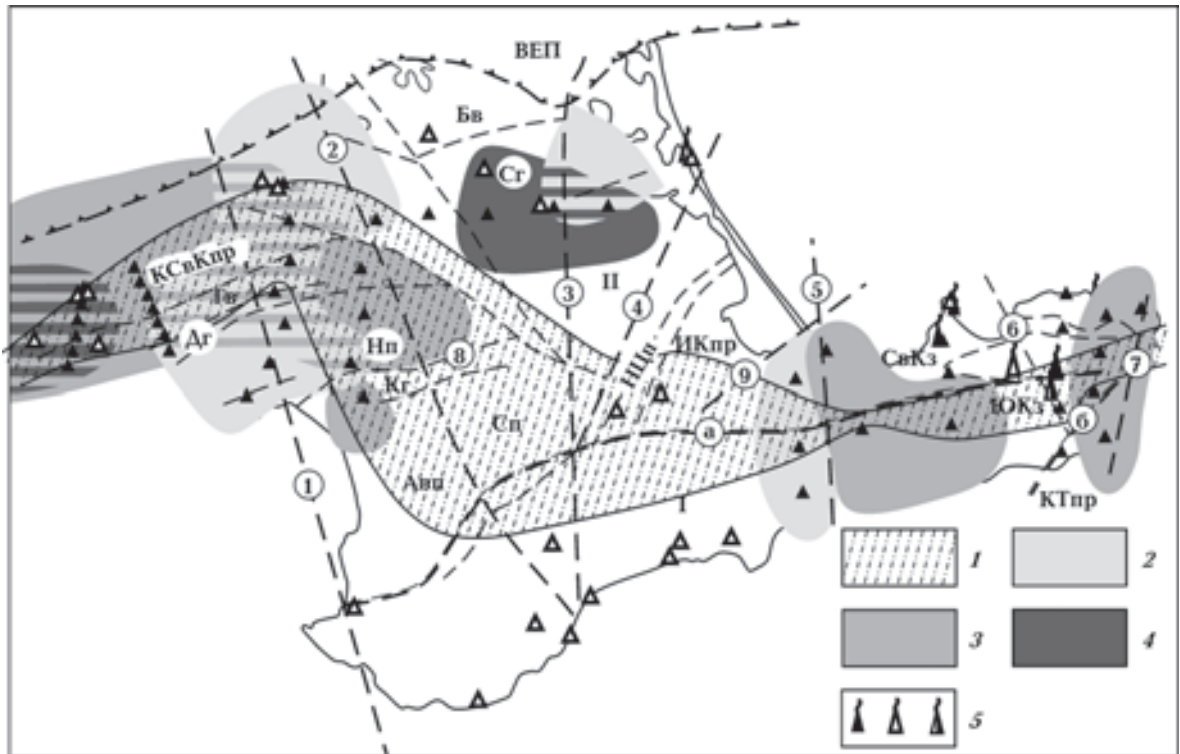


Рис. 11. Аномалии электропроводности по данным качественной интерпретации экспериментальных наблюдений МВП (1) и МТЗ (2—4): 1 — для $T=1800$ с; глубина верхней кромки h , км: 2 — до 10, 3 — более 10, 4 — более 40, 5 — месторождения нефти, газа, газа и конденсата. Остальные условные обозначения см. на рис. 1.

в земной коре и верхней мантии на разных глубинах. Так, наблюдаются три аномальные зоны с верхней кромкой на глубинах (h) до 10 км: 1) на западе Крыма (ограничена с запада Евпаторийско-Скадовским, с востока Салгирско-Октябрьским, на юге Донузлавским разломами, на севере региональным швом между ВЕП и СП) — на юге пр. Краснополянский ($h=2\div 3$ км, S 1000 см), вдоль профиля Евпаторийский ($h=1\div 5$ км, S до 1500 см, углубление в центральной части профиля на ПК 17,5 км до глубины 10 км), на ПК 60 км и 13,5 км профиля Сакский ($h=3$ км, S — от 1000 до 5000 см); 2) на востоке — профиль Джанкойский (h от 2 до 5 км, S до 1000 см) в районе Чонгарского разлома — западного ответвления Мелитопольско-Новоцарицынской зон разломов; 3) вблизи Керченского перешейка в районе Крымско-Керченского поднятия (ограничена на востоке Корсакско-Феодосийской, на севере — Новотитаривской разломными зонами, по обе стороны от Северо-Крымского шва на западе Керченско-Таманского прогиба) — вдоль профиля Феодосийского ($h=2\div 5$ км, S — от 1000 до 5000 см). В земной коре выделены следующие аномальные зоны: 1) в Каркинитско-Северо-Крымском прогибе ($h=10\div 30$ км, S до 5000 см)

по данным вдоль профилей Черноморский, Краснополянский, Евпаторийский и Сакский; 2) в районе Южно-Керченского надвига ($h=10$ км, S до 5000 см) по данным профилей Феодосийского и Керчь-2 западной границей является Корсакско-Феодосийский разлом; 3) субмеридиональная структура Керченско-Таманского прогиба к востоку от Горностаевского разлома ($h=10$ км, S от 2000 до 10000 см, с углублением в сторону Южно-Керченского надвига к $h=20\div 50$ км). Вероятно, две последние структуры соединены между собой по Южно-Керченскому надвику. Аномалии электропроводности на границе земной коры и верхней мантии прогнозируются на Тарханкутском полуострове западнее Евпаторийско-Скадовского разлома ($h=50$ км) и на востоке Каркинитско-Северо-Крымского прогиба ($h=40\div 50$ км) с S от 2000 до 8000 см (ограничена с запада Салгирско-Октябрьской, с востока Чонгарской, на юге — с Донузлавской зонами разломов, на севере — региональным швом между ВЕП и СП).

Обсуждение. Район исследований имеет сложное геолого-тектоническое строение, занимает промежуточное и не до конца определенное структурное положение на стыке трех крупных структурных элементов: ВЕП, СП и

Черноморской впадины. Основная сейсмичность (активность до 5—6 баллов) Крымско-Черноморского региона связана с сейсмогенной зоной, которая протягивается вдоль континентального склона Черного моря 50-километровой полосой и частично захватывает шельф и Южный берег Крыма. Зона выражена 3,5-километровым перепадом рельефа от горных вершин до абиссали Черного моря и почти 15-километровым перепадом тектонического рельефа по мел-кайнозойским отложениям.

Кроме того, не стоит забывать, что регион перспективен на наличие углеводородов, в Причерноморском нефтегазоносном регионе разведано более 60 месторождений нефти и газа. Крупнейшие среди них — Джанкойское, Глебовское, Штормовое, Казантипское. Считаются перспективными на газ и нефть глубинные участки земной коры и подводные недра Черного моря [Лукин, 2006].

Вне всякого сомнения, существует взаимосвязь между проявлением сейсмичности, а также нефтегазоносностью и геоэлектрическими параметрами (рис. 11), которые отражают современное состояние земной коры и верхней мантии и, вероятно, следы воздействия современных мантийных флюидов.

Как показано в работах [Kutas et al., 1998; Бугаенко и др., 2008; Цветкова и др., 2012; Бурахович та ін., 2013; Бурахович, Кушнір, 2015; Бурахович и др., 2015], зоны проявления сверхглубинных флюидов, полученные по данным сейсмотомографии, аномалиям высокой электропроводности в земной коре и верхней мантии (результат квази-3D и 3D моделирование), повышенному тепловому потоку и распространению гипоцентров землетрясений, подтверждают связь сейсмичности Крымского региона с коллизионными процессами.

Выводы. В результате современных экспериментальных наблюдений методами МТЗ и МВП, проведенных в 2007—2013 г. по 9 профилям (48 пунктов), пересекающим различные геологические структуры Крымского региона, получена пространственно-временная картина распределения геомагнитных вариаций и электрического поля на поверхности Земли, по которой можно оценить электропроводность и геоэлектрическую структуру разреза по вертикали и горизонтали. Обработка выполнена с помощью современной программной системы PRC-MTMV, обеспечивающей совместную помехозащищенную оценку импеданса, типпера, горизонтального МВ отклика по синхронным МТ/МВ записям.

Геоэлектрическую модель Крыма, включающую разнообразные тектонические элементы, в первом приближении можно представить следующим образом. Хорошо проводящие образования на поверхности Земли — осадки, морская вода, располагаются на фоне общего высокого сопротивления, характерного для консолидированной коры и верхней мантии, которые включают в себя неоднородные коровые и мантийные хорошо проводящие зоны.

Основной результат качественной интерпретации геоэлектрических исследований — обнаружение областей высокой электропроводности как в земной коре, так и в верхней мантии Крыма с разными проводимостью и глубиной залегания, конфигурацией, по-разному характеризующие геологические структуры. Субвертикальные проводящие зоны часто совпадают с разломными структурами разного порядка, большинство таких объектов приурочено к шовным зонам между различными тектоническими элементами, такими как ВЕП и СП, СП и Горный Крым, Северо- и Южно-Керченская зоны. Это может свидетельствовать о высокой проницаемости для глубинных флюидов шовных зон в процессе их образования.

Некоторые аномалии высокой электропроводности хорошо описаны в литературе и известны. Это, например, уникальная Тарханкутская аномалия электропроводности, расположенная не только на одноименном полуострове Крыма, но и в акватории северо-западной части Черного моря. Аномалия детализирована и уточнена, предполагается сложное многоуровневое глубинное строение данного региона. Кроме того, сложные по структуре аномалии электропроводности предполагаются в пределах Сивашского грабена и Керченского полуострова.

Качественная интерпретация экспериментальных данных методов МТЗ и МВП не дает согласованного представления о глубинном распределении электропроводности Крымского региона, однако комбинация этих методов позволяет гораздо точнее и адекватнее к наблюдаемым экспериментальным данным построить модель распределения удельного сопротивления в рамках трехмерного среды.

Аномалии электропроводности представляют собой один из главных факторов, указывающих на возможную зону проявления геодинамических процессов. Прежде всего? это касается построения моделей формирования

и проникновения в земную кору глубинных высокотемпературных флюидов — важного источника для всех последующих процессов генезиса рудообразования в верхней мантии

и земной коре. Возможные очаги в мантии флюидов должны играть существенную роль в петро-, рудо- и нефтегенезисе, обеспечивать выделение энергии при землетрясениях и пр.

Список литературы

- Александрова Е. Д., Варенцов Ив. М., Куликов В. А., Логвинов И. М., Лозовский И. Н., Пушкарев П. Ю., Соколова Е. Ю., Тарасов В. Н., Шустов Н. Л., Яковлев А. Г. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы. *Геофизика*. 2013. № 2. С. 32—38.
- Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва: Научный мир, 2009. 680 с.
- Бугаенко И. В., Шумлянская Л. А., Заец Л. Н., Цветкова Т. А. Трехмерная R -скоростная модель мантии Черного моря и прилегающей территории. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 5. С. 145—160.
- Бурахович Т. К., Варенцов Ив. М., Гордиенко В. В., Кулик С. Н., Логвинов И. М. О природе Тарханкутской аномалии. *Геофиз. журн.* 1987. Т. 9. № 5. С. 50—58.
- Бурахович Т. К., Кушнір А. М. Розподіл електропровідності в надрах Кримського регіону. *Матеріали XIV Міжнар. конф. з геоінформатики. Теоретичні та прикладні аспекти, 11—14 травня 2015, Київ, Україна*. <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=80196>.
- Бурахович Т. К., Кушнір А. М., Николаев И. Ю., Цветкова Т. А., Ширков Б. И. Комплексная интерпретация сейсмотомографических и геоэлектрических моделей для оценки геодинамических процессов в литосфере Крыма. *Материалы VII Всерос. школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна (Иркутск, 2015)*. [Электронное издание]. Режим доступа: http://conf.nsc.ru/ems2015/ru/ems2015_doklady.
- Бурахович Т. К., Кушнір А. М., Цветкова Т. О., Шумлянська Л. О. Комплексна інтерпретація сейсмотомографічних та геоелектричних моделей для оцінки геодинамічних процесів у літосфері Криму. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2013. № 13 (Ч. II). С. 12—26.
- Бурьянов В. Б., Гордиенко В. В., Завгородняя О. В., Кулик С. Н., Логвинов И. М. Геофизическая модель тектоносферы Украины. Киев: Наук. думка, 1985. 212 с.
- Варенцов Ив. М. Программная система PRC-MT-MV для обработки данных синхронных МТ/МВ зондирований. Материалы VI Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна. [Электронное издание] / Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. Режим доступа: <http://emf.ru/ems2013/section1/Варенцов.pdf>.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Геотермический атлас Украины. Киев: Изд. ИГФ НАНУ, 2004. 60 с.
- Лукин А. Е. Основные закономерности формирования залежей нефти и газа в Черноморском регионе. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2006. № 3. С. 10—21.
- Кулик С. Н., Бурахович Т. К. Глубинное магнитотеллурическое зондирование Тарханкутского полуострова. *Докл. АН УССР. Сер. Б*. 1984. № 12. С. 15—18.
- Кулик С. Н., Бурахович Т. К. Квазитрехмерная геоэлектрическая модель тектоносферы Крыма. *Геофиз. журн.* 1999. Т. 21. № 3. С. 123—126.
- Орлюк М. І., Сумарук Т. П., Сумарук Ю. П., Роме-нець А. О. Оцінка вкладу індукційних струмів у вікову варіацію геомагнітного поля (за даними українських геомагнітних обсерваторій). *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 2. С. 111—120.
- Пристай А. Н., Проненко В. А., Корепанов В. Е., Лаганивский Б. Т. Роль электрических измерений при глубинном магнитотеллурическом зондировании Земли. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 6. С. 173—182.
- Рокитянский И. И. Исследования аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 279 с.
- Рокитянский И. И., Терешин А. В., Трегубенко В. И., Голубцова Н. С., Ингерев А. И., Савченко Т. С. Обзор наблюдений МВП-МТЗ в южной части Кировоградской аномалии электропроводности и первый опыт пленочного моделирования структуры Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 3. С. 92—101.
- Сологуб В. Б., Чекунов А. В. Глубинное строение и эволюция земной коры. В кн.: *Проблемы физи-*

- ки Земли на Украине. Киев: Наук. думка, 1975. С. 118—141.
- Тихоненков Э. П. Основные черты геодинамики Крымского сейсмоактивного региона. *Геодинамика Крымско-Черноморского региона: Сборник материалов конференции*. Симферополь, 1997. С. 35—41.
- Тектоническая карта Украинской ССР и Молдавской ССР. М-6 1:500 000. Гл. ред. В. В. Глушков. Киев: УкрНИГРИ, ГПО Укргеология, 1988.
- Ткачев Г. Н., Свириденко И. А. Некоторые результаты ГМТЗ в Крыму. В кн.: *Электромагнитные исследования*. Киев: Наук. думка, 1978. С. 92—97.
- Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А., Бугаенко И. В. Сверхглубинные флюиды Восточно-Европейской платформы. *Геологическая среда, минерагенические и сейсмотектонические процессы: XVIII Международная конференция (24—29 сентября 2012 г.)*. Воронеж: Научная книга, 2012. С. 392—395.
- Юровский Ю. Г. Сейсмичность и миграция флюидов Керченско-Таманского региона: *Сборник материалов конференции*. Симферополь, 1997. С. 133—134.
- Kutas R. I., Kobleev V. P., Tsvyashchenko V. A., 1998. Heat flow and geothermal modl of the Black sea depression. *Tectonophysics* 291, 91—100.
- Neal S. L., 1998. Variations in the electrical conductivity of the upper mantle beneath North America and the Pacific Ocean. MS Thesis, Indiana University, Bloomington.
- Schmucker U., 1970. Anomalies of geomagnetic variations in the south-western United States. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr.* 13, 1—165.
- Semenov V. Yu., Jozwiak W., 1999. Model of the geoelectrical structure of the mid- and lower mantle in the Europe-Asia region. *Geophys. J. Int.* 138, 549—552.
- Semenov V. Yu., Kulik S. N., Logvinov I. M., 1996. Estimations of the geoelectrical structure of the mantle in Ukraine. *Доп. НАН України* (12), 134—137.
- Tarits P., 1986. Conductivity and fluids in oceanic mantle. *Phys. Earth Planet. Int.* 42(4), 215—222.
- Omura K., 1991. Change of Electrical conductivity of olivine associated with olivine-spinel transition. *Phys. Earth Planet. Int.* 65, 292—307.
- Varentsov Iv. M., 2007. Array of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. In: *Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40)*. Amsterdam: Elsevier. P. 259—273.
- Watson E. B., Brenan J. M., 1987. Fluids in the lithosphere, 1. Experimentally-determined wetting characteristics of CO₂-H₂O fluids and their implications for fluid transport, host-rock physical properties, and fluid inclusion formation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 85, 497—515.

Results of experimental electromagnetic studies of the Crimean region

© Т. К. Burakhovich, A. M. Kushnir, I. Yu. Nikolayev,
Ye. M. Sheremet, B. I. Shirkov, 2016

Spatial-temporal pattern of distribution of geomagnetic variations and electric field on the Earth's surface was obtained as a result of modern experimental observations conducted in 2007-2013 along 9 profiles (48 points) by the methods of magnetotelluric sounding (MTS) and magnetovariation profiling (MVP). These profiles cross various geological structures of the Crimean region. It is possible to estimate the value of electrical conductivity and vertical and horizontal geo-electric structure. The processing of these data is done using modern software system PRC_MTMV (author Iv. M. Varentsov) that provides the common noise-protected evaluation of the impedance, tipper and horizontal magneto-variation response according to synchronous MT/MV records.

The main result of qualitative interpretation of geo-electric research is the detection of high conductivity regions in the Earth's crust and upper mantle of the Crimea, that are characterized by the variations of conductivity, depth and configuration. They characterize the various geological structures differently. The sub-vertical conductive zones often coincide with the fault structures, most of these objects are confined to the suture zones between tectonic elements such as the East European platform and the Scythian plate, the Scythian plate and the Crimean mountain, North and South Kerch zone. This fact may reflect high permeability of the suture zones for deep fluids in the process of their formation.

Some high conductivity anomalies are well-described in the literature and are known. For example, the unique Tarhankut conductivity anomaly, located not only on the eponymous peninsula of Crimea, but also under the water area of the north-western part of the Black Sea. This anomaly was detailed and adjusted and involves a complex multi-level deep structure of the region. In addition, the structurally complex conductivity anomaly is assumed in the Sivash graben and the Kerch Peninsula.

Although the qualitative interpretation of the experimental data of magnetotelluric sounding (MTS) and magnetovariation profiling (MVP) provides inconsistent understanding of the depth distribution of the Crimean region electrical conductivity, the combination of these methods allows constructing the model of resistivity distribution within a three-dimensional environment much more accurately and adequately to the observed experimental data.

Key words: experimental electromagnetic studies, anomalies of conductivity, the Earth's crust and upper mantle, the Crimean region.

References

- Aleksanova E. D., Varentsov Iv. M., Kulikov V. A., Logvinov I. M., Lozovskiy I. N., Pushkarev P. Yu., Sokolova E. Yu., Tarasov V. N., Shustov N. L., Yakovlev A. G., 2013. Deep conductivity anomaly in the northern part of the Voronezh anticline. *Geofizika* (2), 32—38 (in Russian).
- Berdichevskiy M. N., Dmitriev V. I., 2009. Models and methods of magnetotelluric. Moscow: Nauchnyy Mir, 680 p. (in Russian).
- Bugayenko I. V., Shumlanskaya L. A., Zayets L. N., Tsvetkova T. A., 2008. Three-dimensional P-velocity model of the mantle of the Black Sea and the surrounding area. *Geofizicheskiy zhurnal* 30(5), 145—160 (in Russian).
- Burakhovich T. K., Varentsov Iv. M., Gordienko V. V., Kulik S. N., Logvinov I. M., 1987. On the nature of the anomaly Tarkhankut. *Geofizicheskiy zhurnal* 9(5), 50—58 (in Russian).
- Burakhovych T. K., Kushnir A. M., 2015. Conductivity distribution in the interior of the Crimean region. *Proceedings of the XIV Int. Conf. on Geoinformatics. Theoretical and applied aspects, May 11—14, 2015, Kiev, Ukraine* (in Ukrainian). <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=80196>.
- Burakhovich T. K., Kushnir A. M., Nikolaev I. Yu., Tsvetkova T. A., Shirkov B. I., 2015. Integrated Interpretation of geoelectric and seismic tomography models to estimate geodynamic processes in the lithosphere of the Crimea. *Proceedings of the VII All-Russian school-seminar on behalf of electromagnetic soundings of the Earth behalf M. N. Berdichevsky and L. L. Vanyan, Irkutsk, 2015* (in Russian). [Electronic publication]. Access mode: http://www.conf.nsc.ru/ems2015/ru/ems2015_doklady.
- Burakhovych T. K., Kushnir A. M., Tsvetkova T. O., Shumlyans'ka L. O., 2013. Complex interpretation of seismic tomography and geoelectric models to estimate geodynamic processes in the lithosphere of the Crimea. *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukrayiny* (13), 12—26 (in Ukrainian).
- Buryanov V. B., Gordienko V. V., Zavgorodnyaya O. V., Kulik S. N., Logvinov I. M., 1985. Geophysical model tectonosphere Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 212 p. (in Russian).
- Varentsov Iv. M., 2013. PRC-MTMV software system for processing data synchronous MT/MB soundings. *Proceedings of the VI All-Russian school-seminar on behalf of electromagnetic soundings of the Earth behalf M. N. Berdichevsky and L. L. Vanyan, Novosibirsk, 2013*. (in Russian). [Electronic publication]. Access mode: <http://emf.ru/ems2013/section1/Barenцов.pdf>.
- Gordienko V. V., Gordienko I. V., Zavgorodnyaya O. V., Logvinov I. M., Tarasov V. N., Usenko O. V., 2004. Geothermal Atlas of Ukraine. Kiev: IG NASU Publ., 60 p. (in Russian).
- Lukin A. E., 2006. Basic laws of formation of oil and gas deposits in the Black Sea region. *Geologiya i poleznye iskopayemye Mirovogo okeana* (3), 10—21 (in Russian).
- Kulik S. N., Burakhovich T. K., 1984. Deep magnetotelluric sounding Tarkhankut peninsula. *Doklady AN USSR* (12), 15—18 (in Russian).
- Kulik S. N., Burakhovich T. K., 1992. Quasi three-dimensional geoelectric model tectonosphere Crimea. *Geofizicheskiy zhurnal* 21(3), 123—126 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Sumaruk T. P., Sumaruk Yu. P., Romets A. O., 2014. Valuation of induction current contribution to the secular variation of geomagnetic field (according to the data of Ukrainian geomagnetic observatories). *Geofizicheskiy zhurnal* 36(2), 111—120 (in Ukrainian).
- Pristay A. N., Pronenko V. A., Korepanov V. E., Ladanivskiy B. T., 2014. Role of electrical measurements at deep magnetotelluric sounding of the Earth. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(6), 173—182 (in Russian).

- Rokityanskiy I. I., 1975. Studies conductivity anomalies by magnetovariational profiling. Kiev: Naukova Dumka, 279 p. (in Russian).
- Rokityanskiy I. I., Tereshin A. V., Tregubenko V. I., Golubtsova N. S., Ingerov A. I., Savchenko T. S., 2012. Review of observations by MVP-MTS in the southern part of the Kirovograd electrical conductivity anomaly and an experiment of thin film modeling of the Ukrainian Shield structure. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(3), 92—101 (in Russian).
- Sollogub V. B., Chekunov A. V., 1975. Deep structure and evolution of the earth's crust. In: *Problems of Earth Physics in the Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, P. 118—141 (in Russian).
- Tikhonenkov E. P., 1997. Main features of Geodynamics of the Crimean seismically active regions. *Geodynamics of the Crimean Black Sea Region: Proceedings of the conference*. Simferopol, P. 35—41 (in Russian).
- Tectonic Map of the Ukrainian SSR and the Moldavian SSR, 1988. 1:500 000. Ch. Ed. V. V. Glushkov. Kiev: UkrNIGRI, GAP Ukrgeologiya (in Russian).
- Tkachev G. N., Sviridenko I. A., 1978. Some results DMS in Crimea. In: *Electromagnetic research*. Kiev: Naukova Dumka, P. 92—97 (in Russian).
- Tsvetkova T. A., Shumlyanskaya L. A., Bugayenko I. V., 2012. Fluids ultradeep East European platform. *Geological environment, mineragenic and seismotectonic processes: XVIII International Conference (September 24—29, 2012)*. Voronezh: Nauchnaya Kniga, P. 392—395 (in Russian).
- Yurovskiy Yu. G., 1997. Seismicity and fluid migration Kerch-Taman region: *Proceedings of the conference*. Simferopol, P. 133—134 (in Russian).
- Kutas R. I., Kobleev V. P., Tsvyashchenko V. A., 1998. Heat flow and geothermal modl of the Black sea depression. *Tectonophysics* 291, 91—100.
- Neal S. L., 1998. Variations in the electrical conductivity of the upper mantle beneath North America and the Pacific Ocean. MS Thesis, Indiana University, Bloomingtondale.
- Schmucker U., 1970. Anomalies of geomagnetic variations in the south-western United States. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr.* 13, 1—165.
- Semenov V. Yu., Jozwiak W., 1999. Model of the geoelectrical structure of the mid- and lower mantle in the Europe-Asia region. *Geophys. J. Int.* 138, 549—552.
- Semenov V. Yu., Kulik S. N., Logvinov I. M., 1996. Estimations of the geoelectrical structure of the mantle in Ukraine. *Доп. НАН України* (12), 134—137.
- Tarits P., 1986. Conductivity and fluids in oceanic mantle. *Phys. Earth Planet. Int.* 42(4), 215—222.
- Omura K., 1991. Change of Electrical conductivity of olivine associated with olivine-spinel transition. *Phys. Earth Planet. Int.* 65, 292—307.
- Varentsov Iv. M., 2007. Array of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. In: *Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40)*. Amsterdam: Elsevier. P. 259—273.
- Watson E. B., Brenan J. M., 1987. Fluids in the lithosphere, 1. Experimentally-determined wetting characteristics of CO₂-H₂O fluids and their implications for fluid transport, host-rock physical properties, and fluid inclusion formation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 85, 497—515.