

УДК 550.372

МАГНИТОЕЛЛУРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

В.В. Беляевский¹, А.Г. Яковлев^{1,2}, Д.В. Яковлев^{2,3}

¹ Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
108840, Троицк, Московская обл., Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

³ООО «Северо-Запад», 108811, Москва, 22-й километр Киевского шоссе, домовл. 4,
Бизнес центр «Румянцево», стр. 1, корпус «А», офис 412А, Россия

С целью изучения геологического строения при поисках углеводородного сырья в пределах дельты Волги и акватории Каспийского моря выполнены два пересекающихся профиля магнитотеллурического зондирования. Анализ геоэлектрических разрезов, построенных по одномерной инверсии исходных и нормализованных инвариантных кривых каждого сопротивления, показал, что необходимо привлекать методы трехмерного математического моделирования для формирования более достоверных глубинных частей геоэлектрических моделей. Построение стартовых геоэлектрических моделей, необходимых при трехмерной интерпретации инвариантных кривых каждого сопротивления, проводилось с учетом их одномерной инверсии. Результатирующая модель, включающая нижний структурный этаж, построена методом интерактивного подбора к кривым каждого сопротивления модельных кривых, рассчитанных по программе трехмерного математического моделирования. Такой подход позволил учесть влияние локальных гальванических искажений на кривые каждого сопротивления при оценке распределения электропроводности в нижних частях поддонных отложений. В результате проведенной комплексной интерпретации магнитотеллурических данных в поддонных отложениях Северного Каспия выделены блоки с повышенной проводимостью, которые наиболее вероятно связаны с высоким флюидонасыщением меловых и неогеновых отложений. Их положение коррелирует с региональными разрывными структурами региона.

Трехмерное математическое моделирование, удельное электрическое сопротивление, данные магнитотеллурические зондирования, одномерная инверсия

MAGNETOTELLURIC OBSERVATIONS IN THE CASPIAN SEA

V.V. Belyavsky, A.G. Yakovlev, D.V. Yakovlev

To study the geological structure in the search for raw hydrocarbons within the Volga delta and the Caspian Sea, two intersecting profiles of magnetotelluric sounding were performed. The analysis of geoelectric sections based on the one-dimensional inversion of the initial and normalized invariant curves of apparent resistance showed that it is necessary to use methods of three-dimensional mathematical modeling to form reliable geoelectric models. Their initial construction necessary for the three-dimensional interpretation of invariant apparent resistance curves was carried out taking into account their one-dimensional inversion. The resulting model, including the lower structural part, is constructed by the method of interactive matching to the apparent resistance curves of model curves calculated according to the program of three-dimensional mathematical modeling. This approach made it possible to take into account the influence of local galvanic distortions on the apparent resistance curves when evaluating the distribution of electrical conductivity in the lower parts of the subsea deposits. As a result of the integrated interpretation of magnetotelluric data, blocks with increased conductivity have been identified in the subsea deposits of the Northern Caspian Sea, which are most likely associated with high fluid saturation of Cretaceous and Neogene sediments. Their position correlates with the regional discontinuous structures of the region.

Three-dimensional mathematical modeling, electrical resistivity, subsea magnetotelluric sounding, one-dimensional inversion

ВВЕДЕНИЕ

В пределах северной части Каспийского моря и дельты Волги ООО «Северо-Запад» совместно с ГНЦ ФГУП «Южморгеология» опробовали возможности морской геоэлектрики при изучении геологического строения поддонных отложений с целью поиска месторождений углеводородного сырья. Было выполнено два профиля магнитотеллурических зондирований (МТЗ) по типу разнесенных магнитотеллурических установок [Трофимов, Фонарев, 1971] с регистрацией двух ортогональных горизонтальных компонент магнитного поля на острове и перпендикулярных к ним составляющих электрического поля на дне акватории.

До начала двухтысячных годов магнитотеллурические зондирования на морском дне проводились в основном с целью изучения глубинного строения регионов. Применение новых датчиков донных измерений электрического и магнитного полей в надводных условиях позволило получать качественные записи МТ поля в диапазоне периодов 0.001—1000.0 с [Constable et al., 1998]. Это открыло перспективы поиска МТ методами нефтегазовых скоплений на шельфах с учетом проведения их трехмерной (3D) интерпретации. МТ методы не только дополняют сейсмические исследования, но в определенных ситуациях дают новые сведения о конфигурации нефтегазовых покрышек [Zhdanov et al., 2011].

Использование двух вращательных инвариантов тензора импеданса в морской геоэлектрике [Montiel-Alvarez et al., 2020] в режимах ТЕ- и ТМ-мод позволяет учесть смещение системы координат МТ наблюдений от простирания поддонных структур и выполнять двумерную или трехмерную инверсию кривых МТЗ. Мы для определения инвариантных значений тензора импеданса используем ортогональные направления единичных (**1Н**) магнитных векторов, для которых вычисляются максимальный и минимальный импедансы индукции $Z_{\max H}$ и $Z_{\min H}$ [Counil et al., 1986]. Важным свойством фаз этих импедансов является их независимость на низких частотах от локальных геоэлектрических неоднородностей верхней части разреза при двумерных нижних структурах [Беляевский, 2017]. В настоящей статье показано, что одномерная инверсия инвариантных кривых МТЗ, построенных пересчетом их фаз в модули импедансов [Weidelt, 1972], дополненная трехмерным математическим моделированием МТ данных (программа MaxwellF [Druskin, Knizhnerman, 1994]), позволяет учесть проявление «S эффекта» на кривых МТЗ, не отвечающих конформности их основной группы. Это расширяет возможности МТ метода при определении параметров низкоомных блоков в поддонных слоях.

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Магнитотеллурические наблюдения на меридиональном профиле 1 выполнены от разрывных нарушений кряжа Карпинского до Астраханского свода (пр. 1, МТЗ 1—19) и на широтном профиле 2 (МТЗ 212—200) в пределах Калмыцко-Устюртской системы палеозойских дислокаций, в зоне перехода от Восточно-Европейской докембрийской платформы к Скифской эпигерцинской плите (рис. 1). Оценка возможности применения в диапазоне периодов $0.005 < T < 200$ с разнесенных магнитотеллурических установок на севере Каспийского моря проведена с учетом статьи [Гольмшток и др., 1971].

Согласно ей, при значениях $|k_1 h_1| = |(-i\mu_0 2\pi/T\rho_1)^{1/2} h_1| \rightarrow 0$ можно считать импеданс в разнесенных донных установках Тихонова—Каньера независимым от свойств водного слоя ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ — магнитная проницаемость вакуума ($\text{Гн}/\text{м}$), T — период МТ поля (с), ρ_1 — удельное электрическое сопротивление (УЭС) воды ($\text{Ом}\cdot\text{м}$), h_1 — мощность водного слоя (м). При $h_1 \leq 10$ м и $\rho_1 \approx 1$ $\text{Ом}\cdot\text{м}$ (минерализация солями хлорида натрия 5—6 г/л в дельте р. Волга и северной части Каспийского моря) на периодах $T > 0.005$ с магнитное поле на дне моря $\mathbf{H}(h_1) \approx 2\mathbf{H}_0$, где \mathbf{H}_0 — внешнее первичное магнитное поле и $E(h_1) \approx E(h = 0)$. Это позволяет использовать модель Тихонова—Каньера в задачах магнитотеллурики на акваториях.

Наблюдаемые кривые МТЗ часто смешены «S эффектом», формирующимся локальными неоднородностями в верхней части разреза. Обычно их учитывают, приводя на высоких или самых низких частотах кривые $\rho_k^{ob}(T)$ к одному уровню. Однако не у всех наблюденных кривых МТЗ во всем диапазоне периодов сохраняется ус-

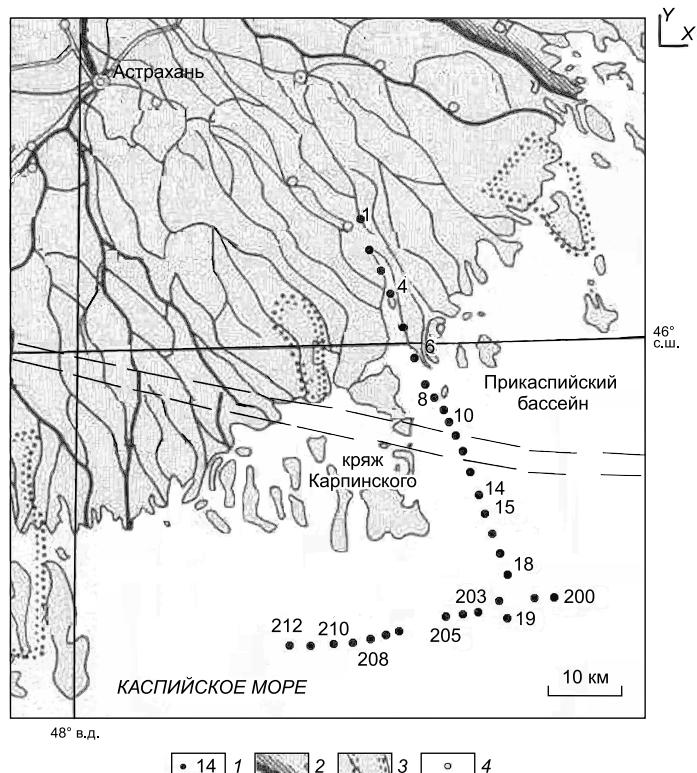


Рис. 1. Схема расположения точек наблюдения (т. н.) МТЗ.

1 — номера т. н.: 1—19 на пр. 1 и 200—212 на пр. 2; граница Российской Федерации (2) и заповедных зон (3), 4 — населенные пункты. Регистрация магнитного поля проведена на острове вблизи т. н. 8. Ось X ориентирована на восток, а ось Y на север. Штриховые линии — границы Астраханского разлома (надвига).

ловие их конформного смещения (стандартный «S эффект»). Это приводит к тому, что при более крутых восходящих ветвях, чем в основной группе конформных кривых МТЗ (рис. 2), стандартный подход к их нормализации по коэффициенту, учитывающему отклонение от основной группы $\rho_k^{ob}(T)$ и последующей 1D инверсии, дает ложные высокоомные аномалии. Для учета таких искажающих эффектов проведено трехмерное моделирование МТ полей по программе Maxwellf, которое позволило скорректировать параметры геоэлектрических разрезов, полученных при 1D инверсии наблюденных и нормализованных кривых МТЗ.

ОБЗОР ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Магнитотеллурические наблюдения выполнены севернее и восточнее небольших нефтегазовых месторождений Укатное, Жамбыл и Жетысу, которые залегают в надсолевых мезозойских отложениях на глубинах около 1.3 км. Основные запасы углеводородного сырья в Северо-Каспийском регионе сосредоточены в Кашаганском и Астраханском месторождениях в подсолевых палеозойских, пермских, каменноугольных и девонских карбонатных отложениях на глубинах 4.1—4.8 км. Они расположены восточнее и западнее района работ, на расстоянии 150—170 км. Флюидоупором для них являются соленосные толщи кунгурского яруса нижней перми с высотой соляных куполов 1.2—1.7 км. На участке МТ наблюдений подошва пермогриасовых отложений контактирует на глубине 1.8—2.0 км с каменноугольными толщами. В пределах пермогриасового комплекса выделяется несколько несогласных границ от останцев в виде «карманов» под предъюрской эрозионной поверхностью [Куницына и др., 2020].

Верхний слой донных отложений представлен песчано-глинистыми и галечно-песчано-глинистыми отложениями (наземных и подводных) дельты р. Волга с УЭС $\rho = 0.2\text{--}8.0 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. В юго-восточной части Каспийского моря УЭС составляет в отложениях: палеогена—неогена $\rho = 0.5\text{--}1.2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, верхнего мела $\rho = 1\text{--}2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, альбского яруса нижнего мела $0.5\text{--}1.0 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (по данным каротажа до 2 Ом·м), аптского и неокомового ярусов нижнего мела до 2 Ом·м, верхних двух ярусов юры $0.4\text{--}2.0 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, нижнего яруса юры $1.0\text{--}0.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (2—6 Ом·м, каротаж), пермогриаса $1\text{--}2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (2—8 Ом·м, каротаж), нижней перми и каменноугольных отложений свыше $50\text{--}1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (часто 20 Ом·м, каротаж) [Умирова, Истекова, 2015]. Их градация по удельному сопротивлению определяется и литологией. В юрско-меловых породах, согласно данным ГИС [Умирова и др., 2016], у пород глинистых $\rho = 0.1\text{--}1.0 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, алевритовых $\rho = 1\text{--}2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; песчаника водонасыщенного 0.2—5.0, а ненасыщенного 3—10; песчаник, насыщенный углеводородом, имеет $\rho = 2\text{--}100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а известняк водонасыщенный 0.3—100, соли 30—100 Ом·м. Низкие сопротивления с $\rho = 0.1\text{--}0.2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ можно объяснить полной связью флюида в цепочках и его минерализации $C > 50 \text{ г/л}$ солями NaCl и HCl [Физические свойства.., 1984]. Метаморфизованные породы характеризуются $\rho = 100\text{--}1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, глинистые 0.3—3.0; терригенно-осадочные толщи 1—10, а карбонатные 5—20 Ом·м [Моловичко, 2014].

ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Этапы построения геоэлектрических моделей:

- формирование максимальных и минимальных кривых магнитотеллурического зондирования из наблюденных импедансов Z_{maxH}^{ob} и Z_{minH}^{ob} , отвечающих единичным ортогональным векторам магнитного поля **1Н** в матрице импедансов $[Z^{ob}]$ [Counil et al., 1986] и импедансов $Z_{\Phi max}^{ob}$ и $Z_{\Phi min}^{ob}$, восстановленным из максимальных и минимальных по модулю фаз $faz\Phi_{max}^{ob}$, $faz\Phi_{min}^{ob}$ фазового тензора [Caldwell et al., 2004], выполнялось с помощью дисперсионных соотношений [Weidelt, 1972] по импедансам \tilde{Z} . Медианное значение \tilde{Z} соответствовало группе импедансов $|Z_{maxH}^{ob}|$, $|Z_{minH}^{ob}|$ на малых периодах МТ поля.

- построение первичных геоэлектрических разрезов распределения $\rho_{in}(h_{in})$ по результатам одномерной инверсии импедансов: индукции Z_{maxH}^{ob} , Z_{minH}^{ob} и фазового тензора $Z_{\Phi max}^{ob}$, $Z_{\Phi min}^{ob}$;

- решение обратной МТ задачи методом интерактивного подбора кажущегося сопротивления к кривым ρ_{maxH}^{ob} , ρ_{minH}^{ob} 3D модельных — ρ_{maxH}^m , ρ_{minH}^m (программа Maxwellf) с учетом результатов 1D инверсии наблюденных кривых ρ_{maxH}^{ob} , ρ_{minH}^{ob} , $\rho_{\Phi max}^{ob}$, $\rho_{\Phi min}^{ob}$ при построении верхнего структурного этажа;

- оценка на тестовых 3D моделях чувствительности инвариантных модельных кривых ρ_{maxH}^m , ρ_{minH}^m определять ρ_m низкоомных блоков.

Геоэлектрические разрезы (1D инверсия) принимались за результатирующую в интервале периодов, где кривые МТЗ не искажены влиянием блоков верхнего этажа с иным УЭС, чем в пластах, в которых они расположены. Проявление стандартного «S эффекта» на кривых фазового тензора $\rho_{\Phi max}^{ob}$, $\rho_{\Phi min}^{ob}$ или индукции ρ_{maxH}^{ob} и ρ_{minH}^{ob} (см. рис. 2, верхний ряд), снималось при их построении преобразованием Вайдельта, учитывающего отклонение на высоких частотах их импедансов от «реперного» $|\tilde{Z}|$.

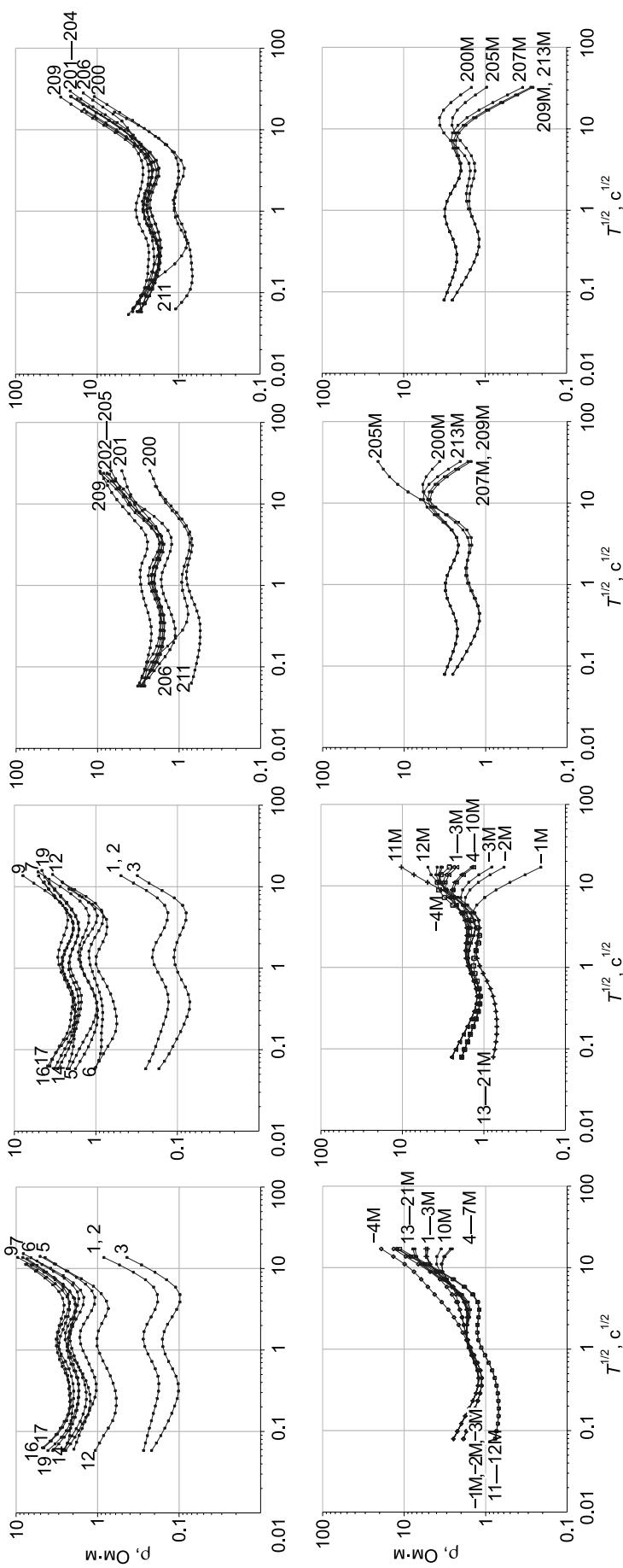


Рис. 2. Наблюденные (верхний ряд) инвариантные кривые каждого сопротивления [Counil et al., 1986] $\rho_{\max H}^{ob}$ и соответствующие им 3D модельные (нижний ряд) ρ_m^m

На пр. 1 и на пр. 2 максимальные ρ_{\max}^{ob} (первый и третий столбцы), а минимальные ρ_{\min}^{ob} (второй и четвертый). Положение т. н. кривых ρ_{\max}^{ob} и ρ_{\min}^{ob} показано на рис. 1—6.

Результирующая трехмерная модель отвечала минимальным расхождениям между наблюденными и 3D модельными кривыми МТЗ (см. рис. 2), а также результатами их 1D инверсии.

АНАЛИЗ МАТРИЦ ИМПЕДАНСОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ОДНОМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ ИХ ИНВАРИАНТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Экспериментальные МТ наблюдения выполнены с установкой, регистрирующей на периодах $T > 0.005$ с горизонтальное магнитное поле на границе земля—воздух в базовой точке, расположенной на острове, а электрическое на расстоянии менее чем 25 км от нее у дна акватории. Анализ размерности изучаемой среды [Бердичевский, Дмитриев, 2009], полученной по тензорам импедансов [Z^{ob}] на профилях 1 и 2 показал:

1. На периодах $T > 0.01$ с на пр. 1 среда характеризуется параметрами: неоднородность $N^{ob} \leq 0.1$ почти горизонтально-однородная и квазидвумерная с асимметрией $skew^{ob} \leq 0.1$ и фазочувствительная $\eta \leq 0.01$ в нижнем этаже, что не противоречит присутствию локальных 3D вставок в верхнем структурном этаже (рис. 3). Аналогичное распределение параметров асимметрии и на пр. 2.

2. На профиле 1 в т. н. 1—4, 13—19 и на пр. 2 в т.н. 207—211, 200—202 кривые $\rho_{\max H}^{ob}$ ориентированы в основном на север (см. рис. 3) по углу $\psi^H + 90^\circ$ (от оси X), где $\psi^H = 90/\pi \{ \operatorname{atan}[(2\operatorname{Re}(Z_{xx}Z_{xy}^* + Z_{yx}Z_{yy}^*) / (|Z_{xx}|^2 - |Z_{xy}|^2 + |Z_{yx}|^2 - |Z_{yy}|^2)] \}$ [Counil et al., 1986], и на запад, северо-запад в т. н. 5—12. На профиле 2 на периодах $T < 100$ с кривые $\rho_{\max H}^{ob}$ также развернуты на север, за исключением т. н. 206—204.

3. На профиле 1 кривые $\rho_{\max H}^{ob}$ и $\rho_{\min H}^{ob}$ (см. рис. 2) конформны, образуя компактную группу, за исключением т. н. 1—3, где «S эффект» сместил их по оси ρ_κ , и т. н. 12, где на низких частотах конформность нарушается. 1D инверсия в т. н. 1—3 наблюденных кривых МТЗ выделяет на глубинах $h_{in}^{ob} > 0.5$ км низкоомные аномалии ρ_{in}^{ob} (рис. 4, *a—e*), отсутствующие при инверсии «нормализованных» кривых фазового тензора $\rho_{\Phi\max}^{ob}$ и $\rho_{\Phi\min}^{ob}$ (см. рис. 4, *ε—e*). На профиле 2 от группы конформных в т. н. 201—210 кривых МТЗ отходят $\rho_{\max H}^{ob}$, $\rho_{\min H}^{ob}$ в т. н. 200 и 211 (см. рис. 2). 1D инверсия кривых $\rho_{\Phi\max}^{ob}$ (рис. 5) дает сглаженные изменения $\rho_{in}^{ob}(h_{in}^{ob})$ за исключением т. н. 200.

Таким образом, геоэлектрические разрезы на рис. 4 и 5 требуют коррекции. Она решалась интерактивным подбором к кривым $\rho_{\max H}^{ob}$, $\rho_{\min H}^{ob}$ 3D модельных $\rho_{\max H}^m$, $\rho_{\min H}^m$ и анализом разрезов $\rho_{in}^{ob}(h_{in}^{ob})$ и $\rho_{in}^m(h_{in}^m)$, полученных при 1D инверсии упомянутых кривых.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Подбор к наблюденным кривым МТЗ выполнялся по стартовым 3D моделям, в которых водный слой с $\rho_1 = 1$ Ом·м, мощностью $\Delta Z_1 = 0.01$ км протягивается по осям X и Y на 200—170 км. Высокоомное основание с $\rho_m = 200—1000$ Ом·м расположено глубже 2.5 км. Сечения результирующей 3D модели для глубин $Z_m = 0.05$ и $Z_m = 0.5$ км представлены на рис. 6, а вдоль осей Y и X на рис. 7, *a* (модельная точка (м. т.) 1M—19M, пр. 1) и рис. 8, *a* (м. т. 205M—213M, пр. 2).

Стартовые модели с глубины $Z_m = 0.01$ и до 0.30 км построены с учетом одномерной инверсии кривых $\rho_{\max H}^{ob}$ (см. рис. 4, *a, b; 5, a, ε*), а глубже кривых фазового тензора $\rho_{\Phi\max}^{ob}$ (см. рис. 4, *ε, δ; 5, δ, δ*). На глубине $Z_{in} > 1$ км их ρ_{in}^{ob} выше, чем у кривых $\rho_{\min H}^{ob}$ и $\rho_{\Phi\min}^{ob}$ (см. рис. 4, *a—ε*). Низкоомные блоки при 1D инверсии модельных кривых $\rho_{\max H}^m$ создают под м. т. 11M и 12M (пр. 1, см. рис. 7, *b*) над блоками с $\rho_m = 0.5$ и 5 Ом·м, заданными в пластах с $\rho_m = 3$ и 50 Ом·м аномалии $\rho_{in}^m(h_{in}^m) < 1.5$ Ом·м (см. рис. 7, *a, b*), аналогичные $\rho_{in}^{ob}(h_{in}^{ob})$ (см. рис. 4, *a—ε*). Под т. н. 1—3 на глубинах $h_{in}^{ob} < 0.01$ км низкоомные блоки, вызывающие «S эффект», учтены нормализацией кривых $\rho_{\max H}^{ob}$ и не приведены на рис. 7, *a*.

1D инверсия кривых $\rho_{\max H}^m$ под м. т. 212M—205M на пр. 2 (см. рис. 8) на глубинах от $h_{in} = 0.15$ и до 0.7 км выделяет область с повышенным ρ_m , отвечая росту $\rho_{in}^{ob}(h_{in}^{ob})$ на рис. 5, *a, ε*.

Из сопоставленных на глубинах $h_{in} > 0.06$ км инверсионных геоэлектрических разрезов кривых $\rho_{\min H}^{ob}$, $\rho_{\min H}^{ob}$ (см. рис. 4, *a—ε*) и 3D модельных $\rho_{\max H}^m$, $\rho_{\min H}^m$ (см. рис. 7, *b; 9, b*) видно, что низкоомные аномалии $\rho_{in}^{ob}(h_{in}^{ob})$ отвечают границам низкоомных блоков под пр. 1. За исключением т. н. 12 (пр. 1), где восходящая ветвь у $\rho_{\max H}^{ob}$ идет круче, чем в группе конформных кривых (см. рис. 2). Это ведет при снятии «S эффекта» конформным перемещением и последующей 1D инверсией к появлению на разрезах $\rho_{in}^{ob}(h_{in}^{ob})$ глубже 0.4 км высокоомной аномалии (см. рис. 4, *ε, δ*), что подтверждается результатами 1D инверсии нормализованных модельных кривых $\rho_{\max H_n}^m$ (см. рис. 7, *ε*) глубже $h_{in}^m > 0.4$ км (м. т. 11M—12M) аномалии с $\rho_{in}^m > 3 \cdot \rho_m$.

В результирующей (см. рис. 7) трехмерной модели А:

— на расстоянии свыше 20 км от блока с $\rho_m = 1000$ Ом·м (м.т. (-1M)—(-4M), см. рис. 7, *δ*), аппроксимирующего северный борт Каспийского моря, на периодах $T < 100$ с инвариант матрицы Визе—Пар-

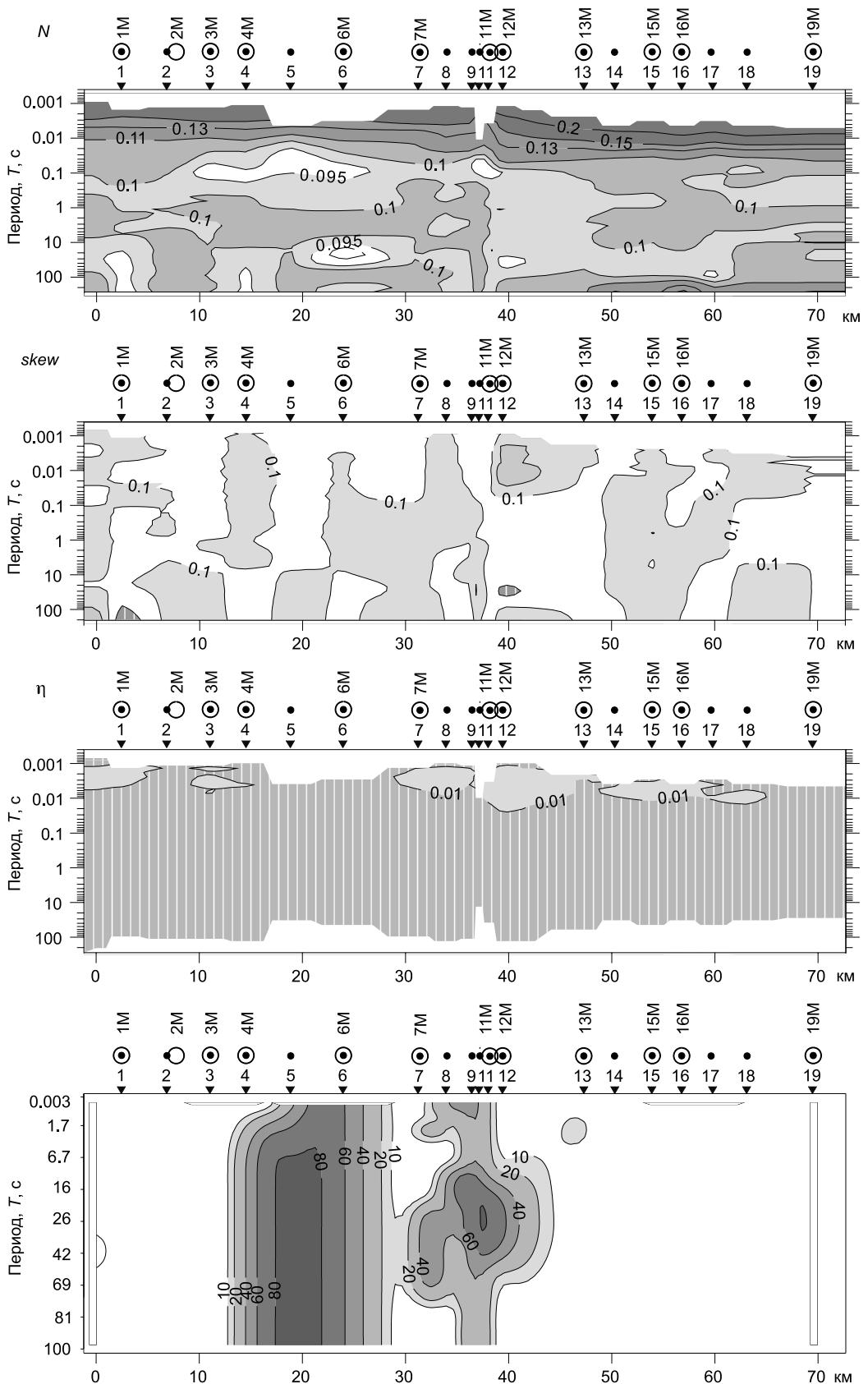


Рис. 3. Распределение на пр. 1 параметров, характеризующих размерность геоэлектрической среды:

N — неоднородность; $skew$ — асимметрия, по Бару [Бердичевский, Дмитриев, 2009]; η — фазочувствительная асимметрия; ψ^H — направление (от оси X) единичного магнитного вектора $1\mathbf{H}$ у максимального импеданса [Counil et al., 1986]. Сверху профилей показано положение т. н.

кинсона $\|Wz^m\|$ уменьшается до $\|Wz^m\| < 0.15$ и влиянием магнитного поля на первичное МТ поле на профилях 1 и 2 можно пренебречь.

— на профиле 1 в интервале периодов $1 < T < 100$ с в м. т. 13M—19M векторы E^m (с углом $\psi^H + 90^\circ$) у импедансов Z_{maxH}^m развернуты по оси Y (см. рис. 7, ε), что близко к ориентации E^{ob} у экспериментальных Z_{maxH}^{ob} в т. н. 5—19 (см. рис. 3). Изменение ориентации E^m на $T > 40$ с в м. т. 4M—11M на широтное коррелирует с уменьшением ρ_m до 1 Ом·м западнее пр. 1 при $\rho_m = 2$ Ом·м в интервале от $Y = -100$ км до $Y = -30$ км (см. рис. 6, a).

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КРИВЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ К УДЕЛЬНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ПОДДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

На 3D моделях, близких к модели А, оценивалась чувствительность кривых ρ_{maxH}^m (см. рис. 9, δ) и ρ_{minH}^m (см. рис. 9, δ) к изменениям ρ_m блоков в интервалах: $-30 < Y < -20$ км (модель В) и $-25 < Y < -20$ км (модель С). Из представленных на рисунках 7 и 9 результатов 1D инверсии $\rho_{in}^m(h_{in}^m)$ следует:

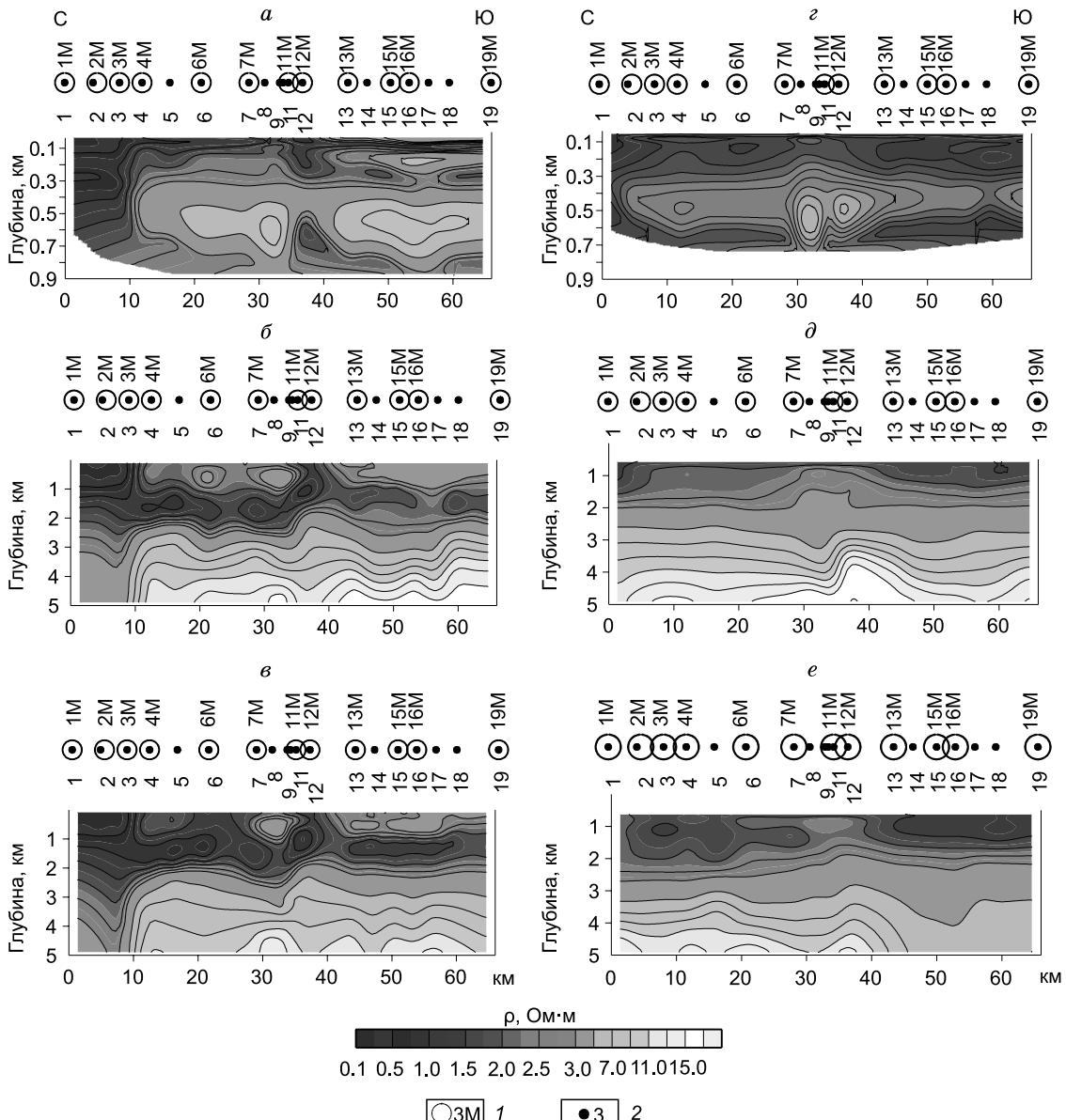


Рис. 4. Результаты 1D инверсии на пр. 1 наблюденных кривых:

индукции ρ_{maxH}^{ob} (a, δ), ρ_{minH}^{ob} (ε) и фазового тензора $\rho_{\Phi max}^{ob}$ (ε, δ), $\rho_{\Phi min}^{ob}$ (ε). Изолинии $\rho_{in}(h_{in})$ в Ом·м. Точки МТЗ: 1 — модельные, 2 — наблюденные.

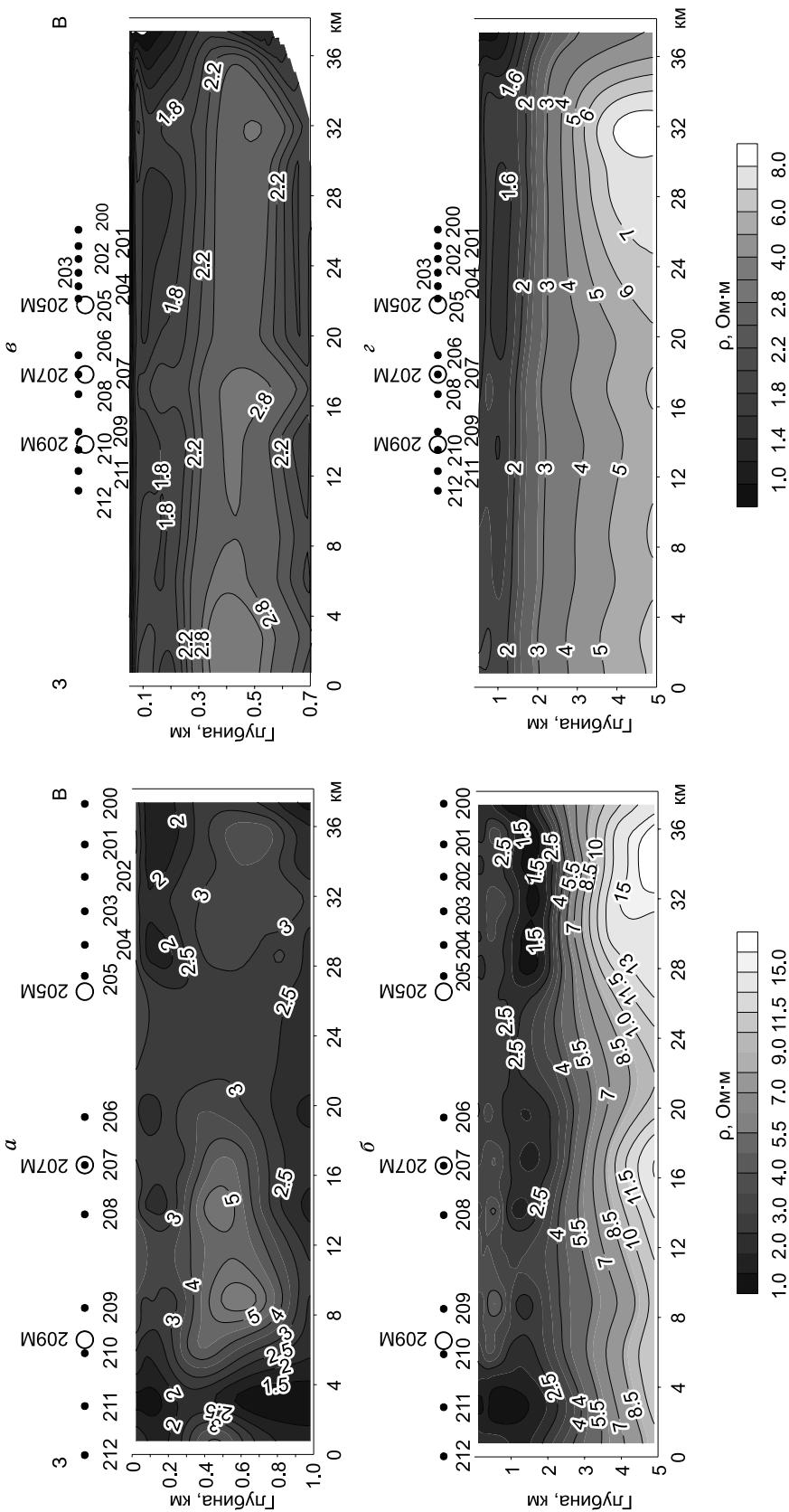


Рис. 5. Результаты 1D инверсии на пр. 2 наблюденных кривых: $\rho_{\max H}^{ob}$ (а, б) и фазового тензора $\rho_{\Phi \max}^{ob}$ (б, в).

Усл. обозн. см. на рис. 4.

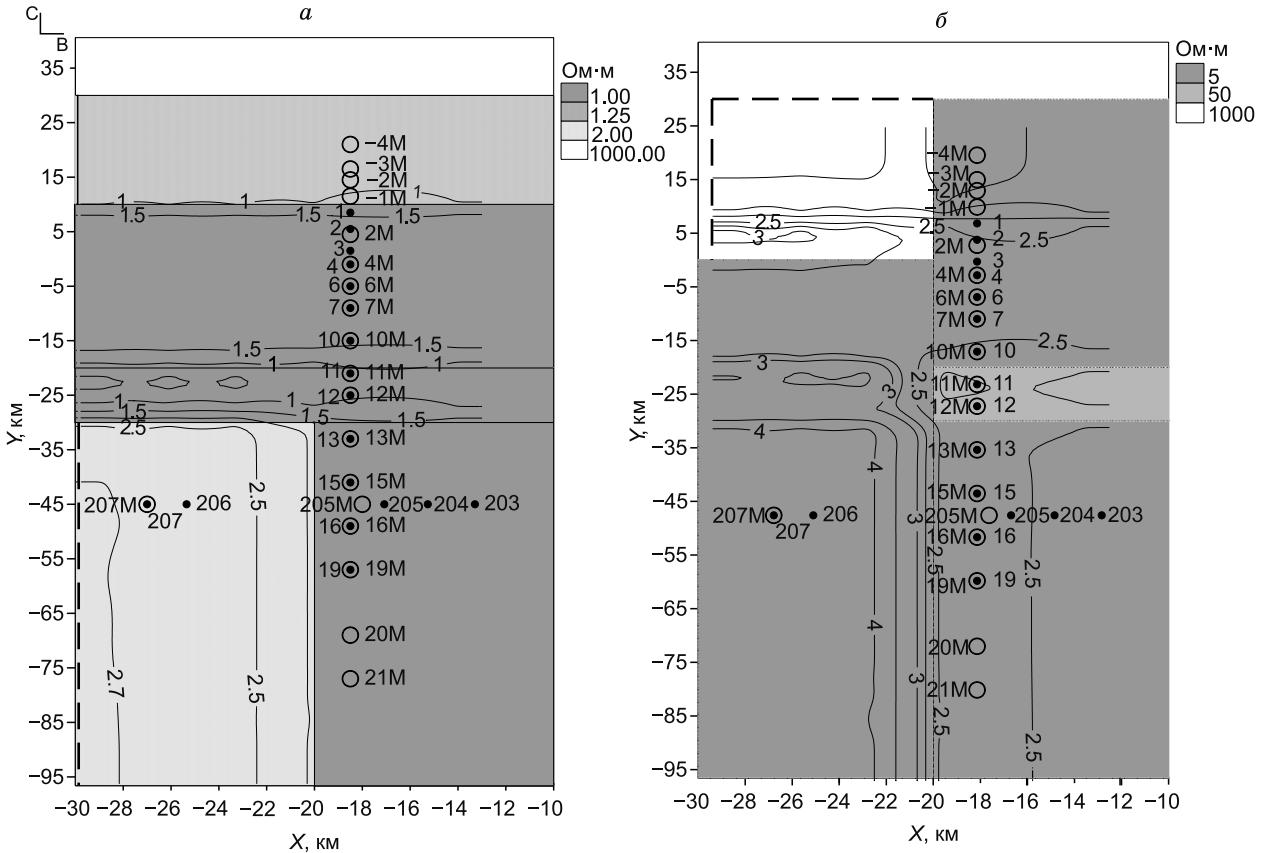


Рис. 6. Сечения модели А на глубинах $Z_m = 0.05$ км (а) и $Z_m = 0.50$ км (б).

Изолинии — результаты 1D инверсии эффективных кривых ρ_{eff}^m , значения ρ_m в модельных блоках даны справа от сечений. Штриховая линия — границы блоков с $\rho_m = 1.0—1.2$ Ом·м и $\rho_m = 50$ Ом·м в моделях В и С, расположенных на глубинах 0.06 и 0.50 км. На срезах номера модельных точек (м. т.) и точек наблюдений (т. н.).

— значения ρ_{in}^m близки к $\rho_m = 1$ Ом·м пластов, залегающих на глубинах $Z_m = 0.05$ и 0.60 км, но пласт с $\rho_m = 50$ Ом·м ($Z_m = 0.3$ км) картируется с $\rho_{in}^m \approx 2.3—3.0$ Ом·м;

— в моделях А и В блоки с $\rho_m = 0.2—0.5$ Ом·м (м. т. 11М — 12М), расположенные на глубинах $Z_m = 10—25$ м в пласте с $\rho_m = 3$ Ом·м проявляются аномалиями с $\rho_{in}^m = 0.5—1.5$ Ом·м до глубин $h_{in}^m = 1—2$ км (см. рис. 7, б; 9, б). Уменьшение их ширины до 5 км (модель С) ведет к росту протяженности аномалий до $h_{in}^m \approx 5$ км. Аналогичная ситуация наблюдается в м. т. -1М и -2М.

В модели А рост ρ_m от 1 до 2 Ом·м в блоке, расположенном западнее м. т. 13М—20М (см. рис. 6, а), разворачивает вектор \mathbf{E}^m вдоль этого блока ($\psi^H = 0^\circ$, см. рис. 7, г), начиная с периодов $T > 1$ с, в то время как в моделях В, С (с $\rho_m = 1$ Ом·м) \mathbf{E}^m ортогонален к нему только до $T < 20$ с. Аналогичное изменение наблюдается на периодах $T > 30$ с в модели В от $\psi^H = 0$ в м. т. 1М—10М (см. рис. 9, г) и до $\psi^H = 90^\circ$ в м. т. 1М—(-4М), где задан блок с $\rho_m = 50$ Ом·м (см. рис. 6, б). В модели А блок с $\rho_m = 1000$ Ом·м разворачивает вектор \mathbf{E}^m вдоль него ($\psi^H = 30—10^\circ$, см. рис. 7, г). Таким образом, ориентация электрического вектора \mathbf{E}^m импеданса Z_{maxH}^m зависит от ρ_m у блоков, расположенных под пр. 1 и за его пределами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Изучение слоистых разрезов, содержащих в верхней части проводящие блоки, сочетанием трехмерного математического моделирования и одномерной инверсии инвариантных кривых МТЗ позволяет избежать трудоемкого процесса трехмерной инверсии, состоящего из переформатирования наблюденных МТ данных, проведения для ряда стартовых 3D моделей серий расчетов с разными программными параметрами. Пример интерпретации МТ данных в пределах дельты Волги и акватории Каспийского моря, проведенной подбором к наблюденным кривым ρ_{maxH}^{ob} 3D модельных ρ_{maxH}^m и их одномерной инверсии, показывает, что устраняются иллюзорные представления, возникающие при 1D-инверсии кривых фазового тензора $\rho_{\Phi max}^{ob}$ (см. рис. 4, д) или нормализованных кривых ρ_{maxH}^m . Так,

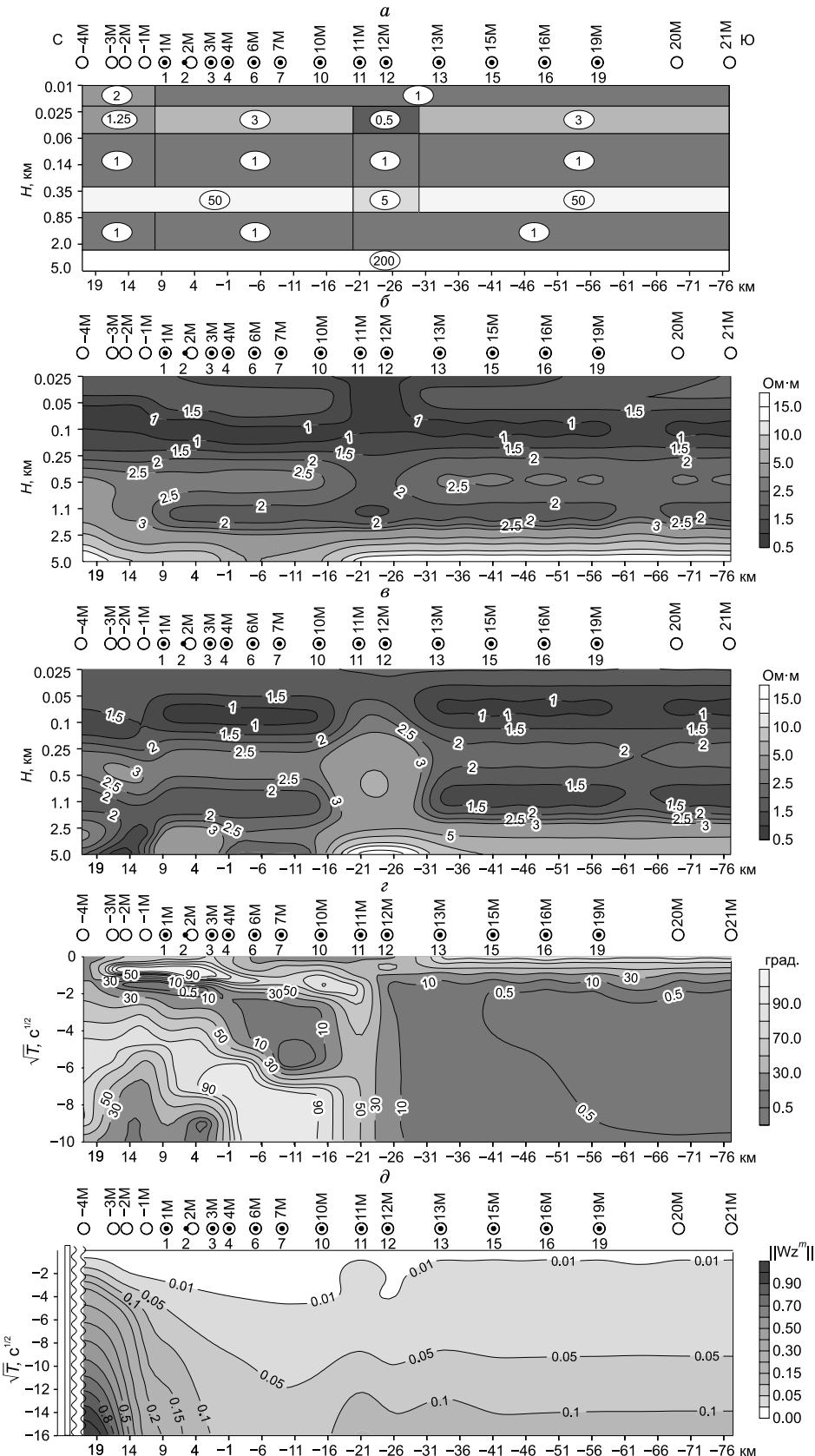


Рис. 7. Сечение вдоль пр. 1 (а) трехмерной модели А для $X = -18$ км, сверху — м. т. (-4M — 20M), ниже т. н. (1—19), в эллипсах — значения УЭС модельных блоков.

Результаты 1D инверсии ρ_{in}^m ($\Omega \cdot \text{м}$): δ — кривых ρ_{maxH}^m ; θ — нормализованных кривых ρ_{maxH}^m ; ε — отклонение вектора 1Н магнитного поля (ψ^H) от оси X импедансов Z_{maxH}^m ; δ — величина инвариантна матрицы Визе—Паркинсона $\|Wz^m\|$. Слева показано положение борта впадины с $\rho_m = 1000$ $\Omega \cdot \text{м}$. По вертикальным осям масштаб для глубин (км) логарифмический, а для \sqrt{T} ($\text{с}^{1/2}$) линейный.

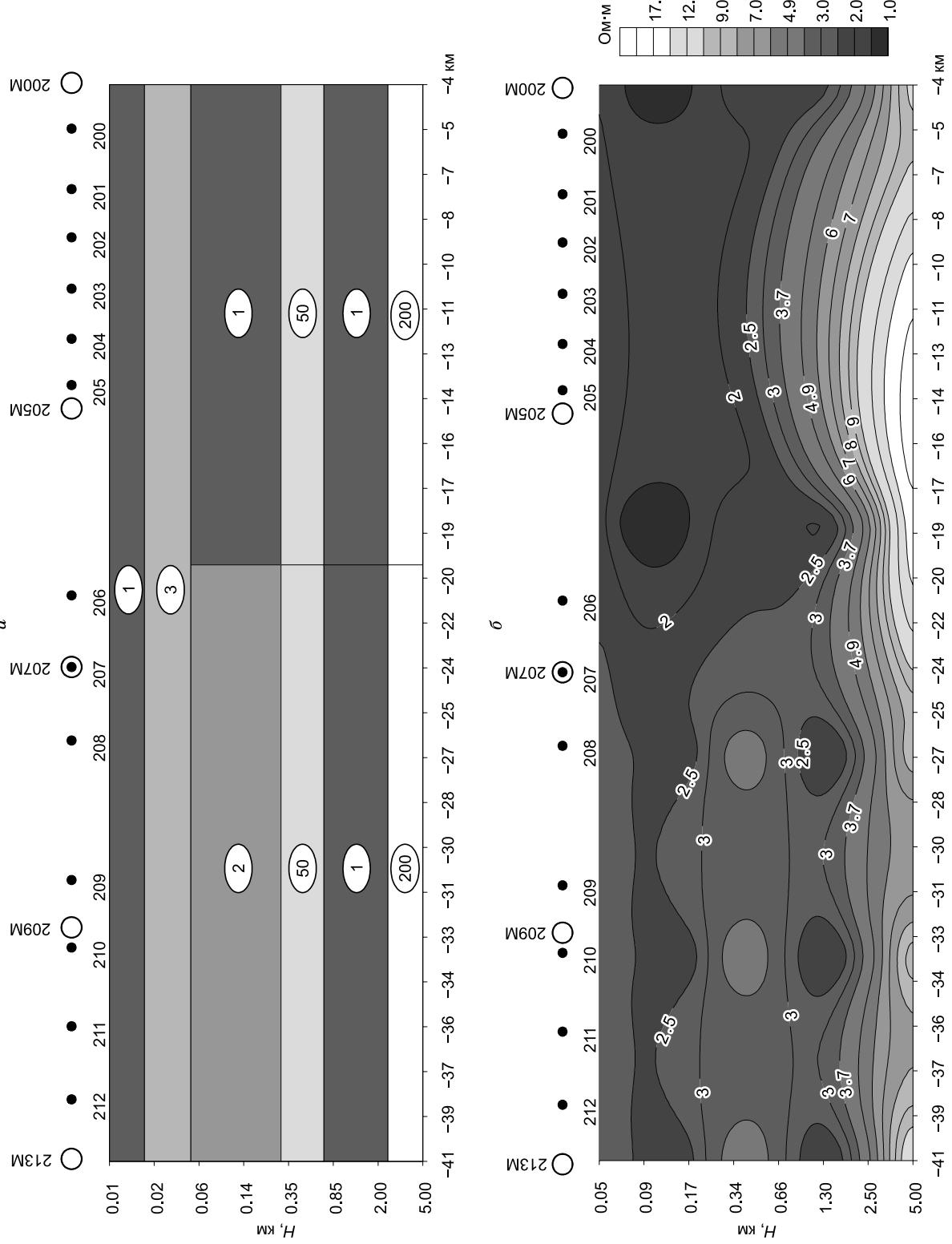


Рис. 8. Сечение 3D модели вдоль пр. 2 (а) и результаты 1D инверсии кривых $p_{\max H}^m$ (б).

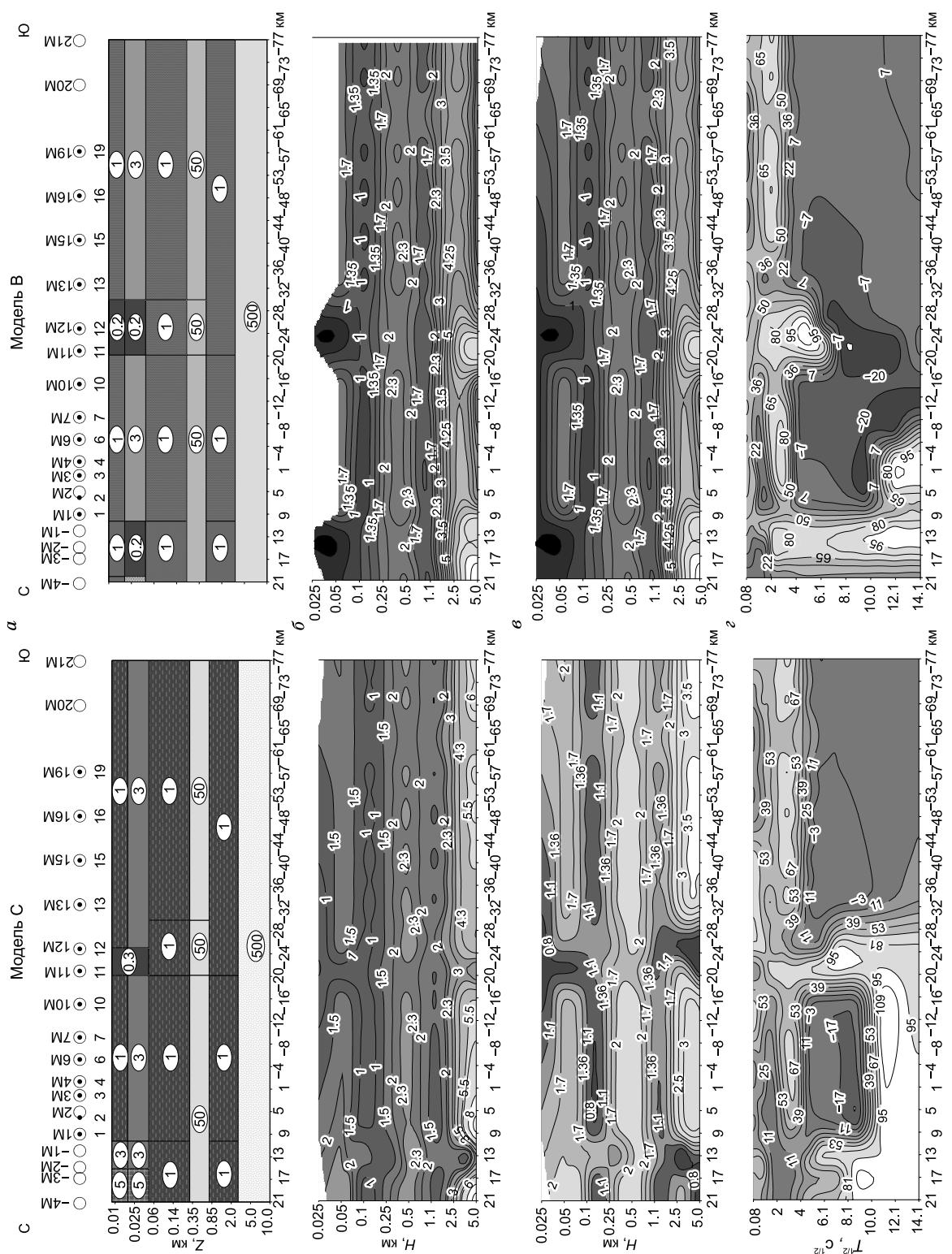


Рис. 9. Результаты одномерной инверсии вдоль пр. 1 ($X = -18$ км).

a — модель В и модель С кривых $\rho_{\min H}^m(\delta)$ и $\rho_{\max H}^m(\delta)$; φ — направления ψ^H (от оси X) магнитного вектора импедансов $Z_{\max H}^m$. По вертикальным осям глубина дана в логарифмическом масштабе, а $\sqrt{T} (c^{1/2})$ в линейном.

появляющийся при инверсии кривых $\rho_{\max H_n}^m$ под т. н. 11, 12 псевдовысокоомный блок (см. рис. 7, в) связан с недоучетом изменения величины «Shift эффекта» при росте глубины проникновения МТ поля.

2. Изучение на тестовых моделях низкоомных аномалий, проявляющихся при 1D инверсии кривых $\rho_{\min H_n}^m$, $\rho_{\max H_n}^m$ показало, что она позволяет оценить геометрические параметры и удельные сопротивления низкоомных вставок в верхних этажах модели, расположенных до глубин $H_m = 0.5$ км (см. рис. 7, 9). Трехмерное моделирование проявило зависимость ориентации векторов магнитного поля **1Н** у импедансов $Z_{\max H}^m$ [Counil et al., 1986] от распределения удельного сопротивления за пределами расположения м. т. МТЗ (см. рис. 6, 7, 9). Это позволяет прогнозировать величины ρ_m в блоках, заданных вне линии профиля.

3. Интерпретация магнитотеллурических данных методом подбора 3D модельных кривых МТЗ к наблюденным инвариантным кривым индукции [Counil et al., 1986] и их одномерной инверсией позволила получить новые представления о геоэлектрической модели Северного Каспия. Она состоит из чередования до глубины 300 м низкоомных неогеновых пластов с $\rho_m = 0.8—3.0$ Ом·м, подстилаемых более высокоомными отложениями верхнего мела мощностью 0.5 км с $\rho_m = 50$ Ом·м, которые залегают на пластах нижнего мела—юры с $\rho_m = 1—2$ Ом·м. Их подошва расположена на породах пермоториасового комплекса с $\rho_m = 100—200$ Ом·м, картируемого на глубине 2.3—2.5 км (см. рис. 7, а, б).

Проводящие блоки под т. н. 11, 12 пр. 1 (см. рис. 7, а, б) коррелируют с зоной надвига структур Калмыцко-Устюртской системы палеозойских дислокаций (Астраханский разлом) (см. рис. 1). Понижение их удельного сопротивления может быть связано с ростом минерализации воды, ее более высоким содержанием или повышенной связанностью флюидонасыщенных пор. Это является важным критерием при поисках углеводородного сырья. Параметры нефтегазовых покрышек и подводящих флюид каналов могут быть уточнены проведением в дальнейшем детальных исследований донными магнитотеллурическими методами.

Полевые работы выполнялись ООО ГП «Северо-Запад» совместно с ФГУП «СНИИГГиМС», которым авторы выражают слова благодарности. Интерпретация магнитотеллурических данных выполнена в порядке личной инициативы при поддержке руководства ЦГЭМИ ИФЗ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Беляевский В.В. Трехмерная интерпретация магнитотеллурических данных с использованием инвариантных характеристик МТ поля. LAP-LAMBERT, Academic Publishing, Saarbrucken, Deutschland, 2017, 556 с.

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М., Научный мир, 2009, 680 с.

Гольмшток А.Я., Сочельников В.В. Методика морских магнитотеллурических исследований осадочной толщи и поверхности кристаллического фундамента // Прикладная геофизика, 1971, № 62, с. 93—103.

Гольмшток А.Я., Полонский Ю.М., Сочельников В.В., Кондрашев Н.В. Морские магнитотеллурические зондирования // Геомагнитные исследования, 1975, № 16, с. 59—76.

Куницына И.В., Дердуга А.В., Никишин А.М., Короткова М.А. Тектоническое строение и история развития палеозойского комплекса Северного Каспия // Геология нефти и газа, 2020, № 3, с. 11—18, doi: 10.31087/0016-7894-2020-3-11-18.

Моловичко М. С. Электромагнитные геометрические зондирования с донными косами при поисках углеводородов на мелководье: Автoref. дис....к.т.н. СПб, ООО «РПК АМИГО-ПРИНТ», 2014, 20 с.

Трофимов И.Л., Фонарев Г.А. Градиентные способы глубинных электромагнитных зондирований на океане // Геомагнетизм и аэрономия, 1971, с. 742—743.

Умирова Г.К., Истекова С.А. Геофизические исследования при изучении геологического строения и оценки нефтегазоносности юга Прикаспийской впадины в Казахстане // Вестник КазНТУ, 2015, с. 3—12.

Умирова Г.К., Истекова С.А., Модин И.Н. Магнитотеллурические зондирования при оценке нефтегазоносности мезозойского комплекса Западного Казахстана // Вестник Моск. ун-та, Серия 4, Геология, 2016, № 4, с. 52—58.

Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) / Ред. Н.В. Дортман. М., Недра, 1984, 455 с.

Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int., 2004, v. 158, p. 457—469, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02281.

Constable S.C., Orange A.S., Hoversten G.M., Morrison H.F. Marine magnetotellurics for petroleum exploration. Part 1: A sea-floor equipment system // Geophysics, 1998, 63 (3), p. 816—825.

Counil J.L., le Mouël J.L., Menvielle M. Associate and conjugate directions concepts in magnetotellurics // Ann. Geophys., 1986, v. 4 (2), p. 115—130.

Druskin V., Knizhnerman L. Spectral approach to solving three-dimensional Maxwell's diffusion equations in the time and frequency domains // Radio Sci., 1994, v. 29 (4), p. 937—953.

Montiel-Álvarez A.M., Romo J.M., Constable S., Gómez-Treviño E. Invariant TE and TM impedances in the marine magnetotelluric method // Geophys. J. Int., 2020, v. 221, p. 163—177, doi: 10.1093/gji/ggz571.

Weidelt P. The inverse problem of geomagnetic induction // Z. Geophys., 1972, v. 38, p. 257—290.

Zhdanov M.S., Wan Le, Gribenko A., Ćuma M., Key K., Constable S. Large-scale 3D inversion of marine magnetotelluric data: Case study from the Gemini prospect, Gulf of Mexico // Geophysics, 2011, v. 76 (1), p. F77—F87, doi: 10.1190/1.3526299.