

УДК 550.837.211:553.98(574)

Г.К. Умирова¹, С.А. Истекова², И.Н. Модин³

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ МЕЗОЗОЙСКОГО КОМПЛЕКСА ЗАПАДНОГО КАЗАХСТАНА

Приведены результаты опытных электроразведочных работ методом магнитотеллурического зондирования на одном из месторождений Западного Казахстана. На основе обработки и интерпретации электрометрических данных создана цифровая геоэлектрическая модель района работ, построен геоэлектрический разрез по опытному профилю. Показана возможность эффективного применения МТ-зондирования в комплексе с данными сейсморазведки и ГИС для уточнения геологического строения и выделения перспективных нефтегазоносных участков мезозойских терригенно-осадочных комплексов.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, нефтегазоносность, Западный Казахстан, тензор импеданса, геоэлектрический разрез.

The article shows results of test electrical surveys conducted on one of deposits of Western Kazakhstan. Digital geoelectric model and test sections of the area were constructed by the results of processing and interpretation of electrometric data. Effective using of MT sounding with complex of seismic and well-logging data for classification of a geological structure and allocation of prospective oil and gas areas ofterrigeneously-sedimentary deposits of Mesozoic period is also shown in the article.

Key words: magnetotelluric soundings, oil and gas content, Western Kazakhstan, impedance tensor, geoelectrical section.

Введение. Магнитотеллурическое (МТ) зондирование (МТЗ) основано на одновременном измерении вариаций электрического (теллурического) и магнитного полей Земли. Основные измеряемые величины — электрические (E_x , E_y) и магнитные (H_x , H_y , H_z) составляющие. Удельное сопротивление среды определяется из импеданса, который представляет собой отношение горизонтальных составляющих электромагнитного поля — электрической к магнитной (E_x/H_y) и (E_y/H_x) на разных периодах (частотах) колебаний поля. В традиционной схеме электромагнитных зондирований, использующих магнитотеллурическое поле, метод МТЗ играет ведущую роль для стратификации среды, геоэлектрического районирования, трассирования горизонтальных изменений электропроводности, выделения проводящих слоев в верхних и нижних слоях земной коры [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Методика и техника МТ-исследований. На территории Казахстана начиная с 2005 г. электроразведочные исследования на месторождениях углеводородов методом МТЗ проводятся силами ТОО «НПЦ «Геокен». Рассмотрим результаты, полученные на одном из участков в Западном Казахстане (рис. 1).

Геоэлектрическая модель среды, которая получается в результате интерпретации МТ-данных, несет информацию о физических и геологических свойствах изучаемого разреза (проводимости, ли-

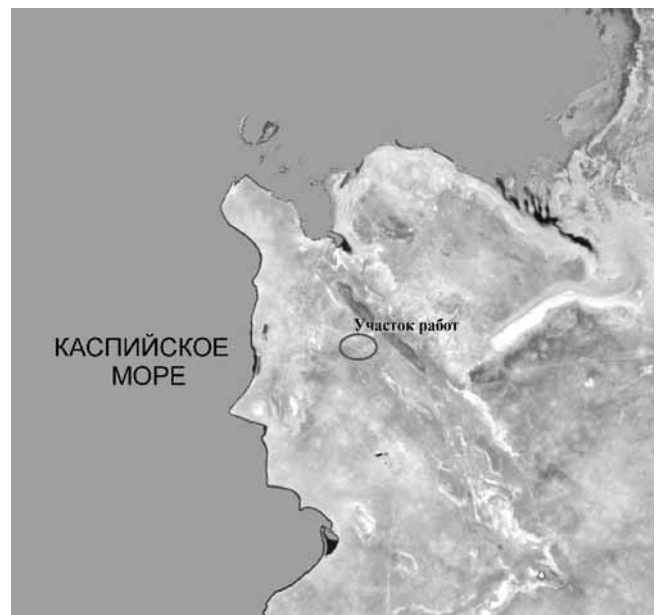


Рис. 1. Положение района исследований

¹ ТОО «НПЦ «Геокен», вед. геофизик; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ст. преп., PhD докторант; e-mail: gulmuha@mail.ru

² Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, докт. геол.-минерал. н., профессор; e-mail: istekovy@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, докт. техн. н., профессор; e-mail: imodin@yandex.ru

тологии, флюидонасыщенности и др.) [Даукеев и др., 2002].

МТ-зондирование на участке проводили с целью изучения и уточнения геологического строения мезозойского комплекса отложений, оценки продуктивности выявленных сейсморазведкой структур и выделения участков профилей с улучшенными коллекторскими свойствами [Истекова, Умирова, 2014], подготовки рекомендаций для проведения детальных электроразведочных и других геофизических исследований.

На участке исследований бурением параметрических, поисковых и разведочных скважин вскрыты верхнепалеозойские, триасовые, юрские и нижнемеловые отложения. Основные продуктивные комплексы представлены отложениями средней юры и неокомского яруса нижнего мела, где выявлены нефтяной горизонт Ю-I и неокомский горизонт А. Эти залежи нефти классифицируются как пластовые, литологически и тектонически экранированные [Умирова и др., 2015].

Полевые работы выполнены с применением современных аппаратно-программных комплексов и технологий. Регистрация электромагнитного поля осуществлялась 5-канальными станциями MTU-5 («Phoenix Geophysics LTD», Канада).

Обработка и интерпретация МТ-данных. На этапе анализа МТ-данных исследованы различные пространственно-частотные характеристики тензора импеданса. Анализ МТ-данных включал:

- изучение амплитудных и фазовых кривых МТЗ;
- выявление и подавление влияния локальных приповерхностных неоднородностей;
- построение и анализ частотных разрезов параметров тензора импеданса, показывающих соответствие реальной среды 1D-, 2D- или 3D-модели;
- построение и анализ карт амплитудных и фазовых полярных диаграмм тензора импеданса на характерных периодах.

Стандартные способы интерпретации профильных данных магнитотеллурических зондирований — 1D- и 2D-инверсии. В работе [Персова и др., 2012] отмечено, что 1D-инверсию можно применять только для восстановления самой верхней части разреза, которая обычно характеризуется горизонтальной слоистостью. 2D-инверсия может давать адекватный реальности результат в случае, когда все значимые неоднородности вытянуты преимущественно ортогонально профилю. Если же неоднородности не вытянуты, то применение 2D-инверсии может приводить к появлению ложных глубинных аномалий. Ложные аномалии при использовании 2D-инверсий могут появляться и из-за влияния не попадающих под профиль (боковых) неоднородностей. Кроме того, в результате выполнения 2D-инверсии могут существовать участки, где необходимый уровень невязки не может быть

достигнут, что вполне определенно указывает на существенную трехмерность исследуемой среды [Персова и др., 2012].

Процедуру интерпретации электроразведочных данных на участке работ выполняли в два этапа: 1) количественная интерпретация кривых МТЗ с получением геоэлектрических разрезов; 2) последующая геологическая интерпретация геоэлектрических разрезов с построением геолого-геофизических разрезов. Геологическая интерпретация проводилась по полученным разрезам сопротивлений на основе результатов обобщения скважинной информации [Истекова и др., 2015].

Граф количественной интерпретации выбран на основе проведенного анализа МТ-данных для детального расчленения юрско-меловой части разреза.

Для получения первого приближения и выявления основных особенностей геоэлектрического строения осадочного чехла выполнена 1D-инверсия кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса в программе MTSPProfInv. Следующим шагом количественной интерпретации был одномерный ручной подбор по программе IPI_2D_WIN_MT. На этом этапе использованы результаты автоматической 1D-инверсии в качестве стартовой модели, информация о геометрии основных сейсмических горизонтов, каротажные диаграммы по скважинам.

Анализ формы результативных кривых на участке работ показывает, что все кривые основных компонент по амплитуде и фазе хорошо согласуются между собой и близки по форме. Небольшие расхождения среди кривых наблюдаются до \sqrt{T} около $10 \text{ с}^{1/2}$. Кажущееся сопротивление ρ_T в начале различных кривых лежит в диапазоне от 0,3 до 0,5 Ом·м, что соответствует относительно низкоомным приповерхностным отложениям (рис. 2).

Затем на кривых ρ_T наблюдается пологая восходящая ветвь с перегибом, соответствующим проявлению более высокоомных верхнемеловых пород. Минимум при $\sqrt{T} \approx 2 \text{ с}^{1/2}$ отвечает проводящим отложениям надсолевого комплекса, минимальные значения ρ_T составляют 0,6–5,0 Ом·м. Высокоомные отложения проявляются на кривых в виде крутой восходящей ветви. Наличие одного широкого минимума на кривых свидетельствует о присутствии надсолевого комплекса в разрезе низкоомных отложений. Породы нижних комплексов вплоть до фундамента имеют высокое сопротивление.

Компоненты тензора импеданса Z_{XY} и Z_{YX} практически совпадают, за исключением самого конца кривой и области широкого минимума, где в низкоомных отложениях надсолевого комплекса на некоторых участках площади сказывается вытянутость структур.

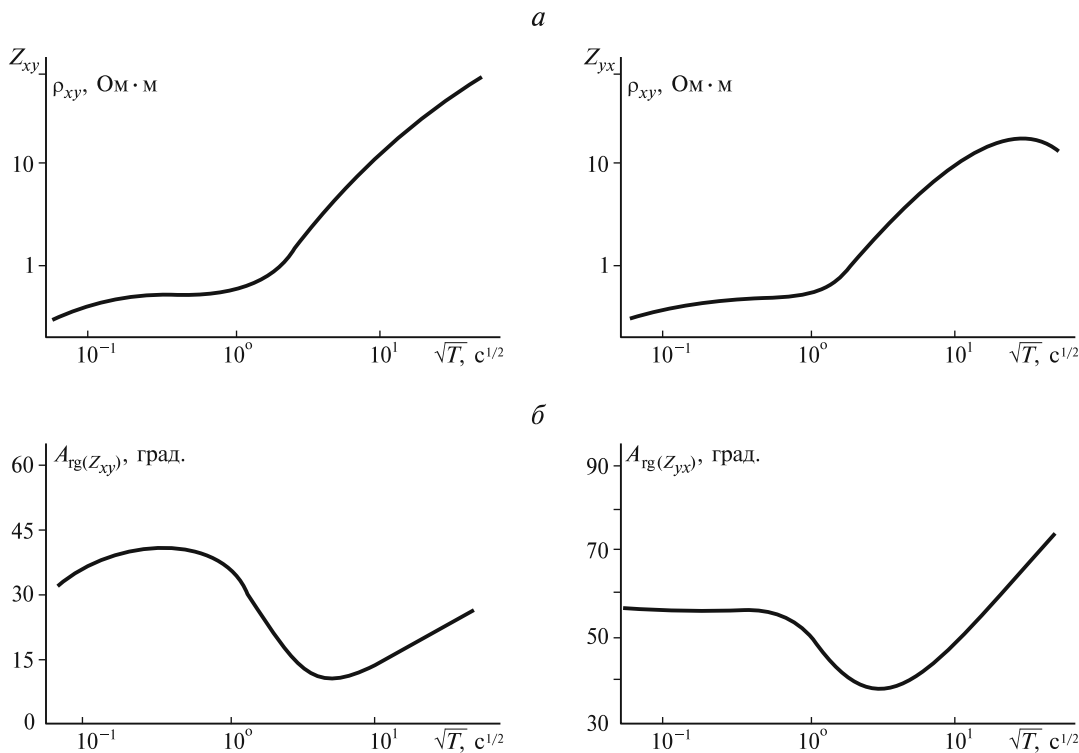


Рис. 2. Кривые кажущегося сопротивления (а) и фазы импеданса (б) по опытному профилю 1

На этом же этапе выполнена нормализация кривых МТЗ — процесс, подавляющий влияние S-эффекта, он проявляется за счет объектов, которые не могут быть учтены в рамках рассматриваемой интерпретационной модели. В задачу нормализации прежде всего входит исключение влияния локальных приповерхностных неоднородностей.

В процессе обработки проанализированы разрезы параметров тензора импеданса по опытному профилю на участке работ. В анализе рассматривались значения параметра неоднородности N на разных периодах, параметры асимметрии Свифта ($Skew_S$, амплитудный параметр) и фазовый параметр $Skew_B$. Амплитудный параметр N указывает на то, что геоэлектрический разрез отличается от одномерного. Для опытного профиля амплитудный параметр $N \geq 0,1-0,2$, что указывает на горизонтальную слоистость разреза. Небольшое увеличение амплитудного параметра N отмечалось при $\sqrt{T} > 10 \text{ с}^{1/2}$, что связано с влиянием региональных неоднородностей.

Амплитудный ($Skew_S$) и фазовый ($Skew_B$) параметры указывают на отличие геоэлектрического разреза от двухмерного. В нашем случае значения параметров $Skew_S$ и $Skew_B$ составляли $0,1-0,2$ и немного превышали $0,2$ в области региональных неоднородностей, отмеченных выше. Это значит, что геоэлектрический разрез имеет двухмерный характер.

Такая в целом одномерная ситуация в верхней части разреза позволяет перейти от кажущихся сопротивлений по двум перпендикулярным направлениям (XU и YX) к среднегеометрическому сопротивлению. На рис. 3 представлен резуль-

тативный геоэлектрический разрез по опытному профилю 1.

На результирующих разрезах кажущегося сопротивления на профиле 1 четко выделяются три слоя: 1) однородный, очень низкоомный слой верхней части разреза с значениями сопротивления от $0,1$ до $0,4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 2) слой с незначительным повышением сопротивления от $0,6$ до $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 3) нижний слой, выраженный областью градиентного повышения сопротивления до $25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Выделенные слои можно увидеть и на кривых МТЗ.

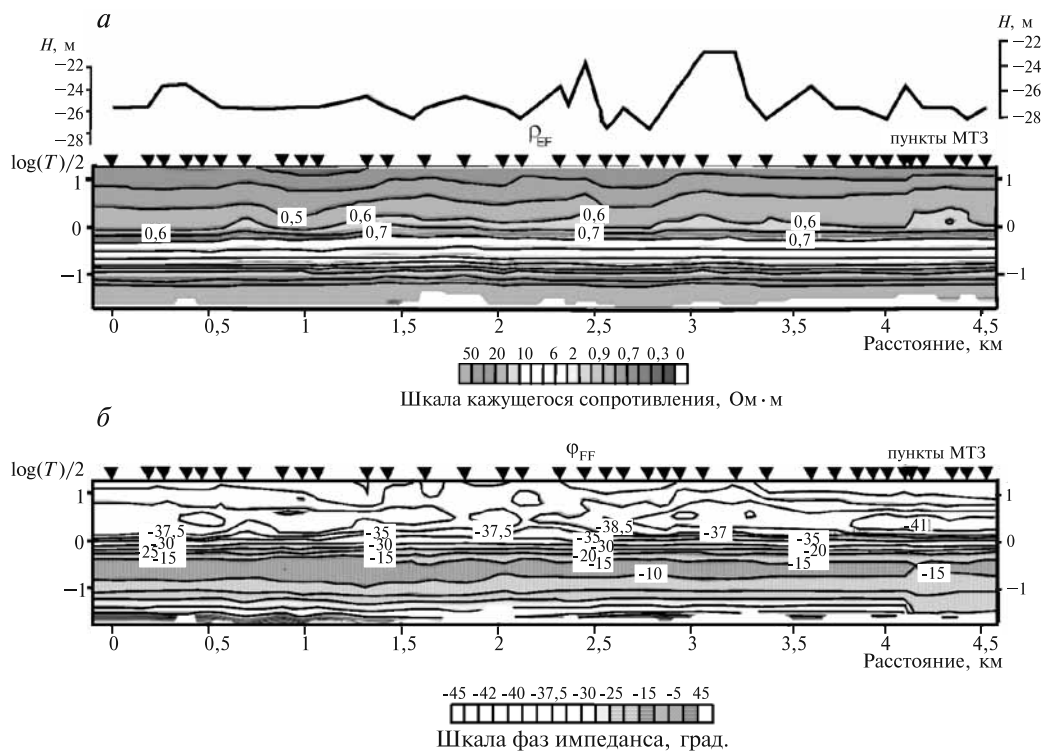
Первый и второй низкоомные слои на профиле 1 разреза кажущегося сопротивления достаточно выдержаны. Более информативен разрез фазы импеданса. На этом разрезе и 1-й, и 2-й слои осложнены серией линейных неоднородностей. Например, на профиле 1 между пикетами МТЗ 2,5 и 4,5 км видна довольно протяженная зона изменения фаз импеданса. Далее прослеживается 3-й слой, в котором наблюдается градиентное повышение сопротивления до $30-40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Совместный анализ распределения сопротивления пород в разрезе в зависимости от литологического состава по данным ГИС позволил сделать следующие выводы.

Для юрско-меловых пород наблюдается следующие тенденции в распределении геоэлектрических свойств:

- глинистые породы обладают наименьшим сопротивлением (в среднем около $0,1-1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);
- алевритовые породы имеют большее сопротивление, чем глины (в среднем около $1-2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);
- песчаные породы характеризуются самым большим сопротивлением (в среднем $3-10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Рис. 3. Результативный геоэлектрический разрез кажущегося сопротивления (а) и фазы импеданса (б) по опытному профилю 1



Таким образом, породы хорошо разделяются по сопротивлению: глины обладают наименьшим сопротивлением, алевролиты — средним, пески и песчаники — высоким. Известковистые алевролиты распространены незначительно. Они имеют такое же сопротивление, как и песчаные породы. В целом в разрезе преобладают алевролиты и песчаники.

С использованием опорных сейсмических горизонтов получен набор интервалов повышенного сопротивления, которые выявлены по данным МТЗ. На рис. 4 представлены графики зависимости значений сопротивления юрско-меловых пород от глубины.

Анализ этих графиков показывает, что в районе магнитотеллурических исследований с увеличением минерализации грунтовых вод сопротивление пород уменьшается. У песков и песчаников с высокой удельной пористостью сопротивление значительно падает. У глин изменение сопротивления гораздо более слабое, так как фильтрационный потенциал глин небольшой и в них содержится большое количество «связанной» воды с низкой минерализацией. При большой минерализации (>50 г/л) в песчано-глинистых отложениях наблюдается инверсия сопротивления — водонасыщенные пески и песчаники становятся гораздо более проводящими, чем глины.

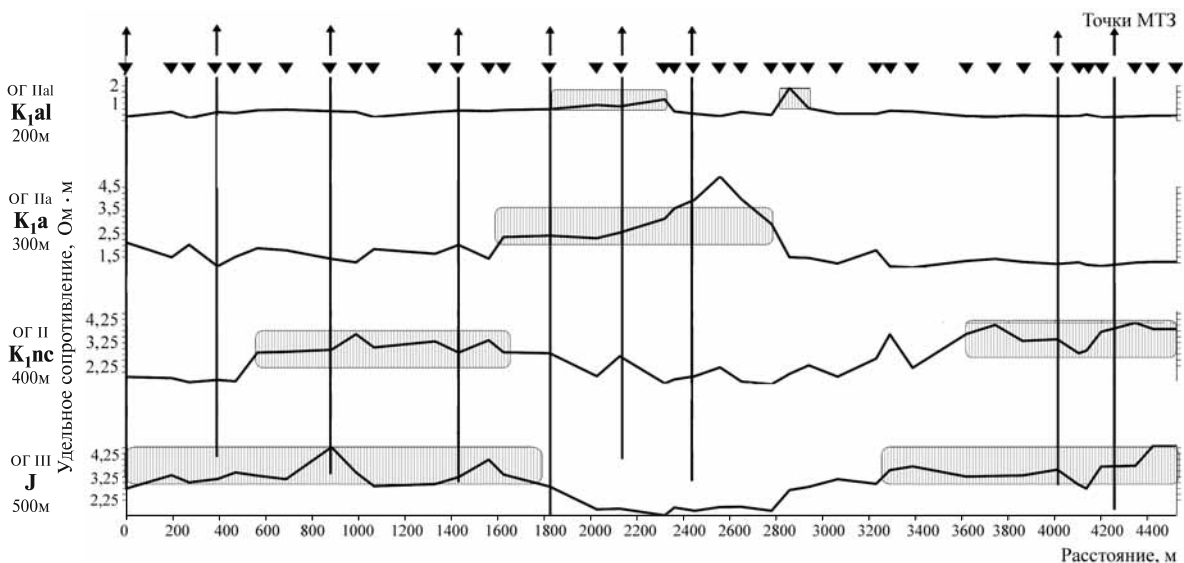


Рис. 4. Графики распределения удельного сопротивления юрско-меловых отложений по профилю 1: K_{1al} — альбские отложения, K_{1a} — аптские отложения, K_{1nc} — неокомские отложения, J — юрские отложения

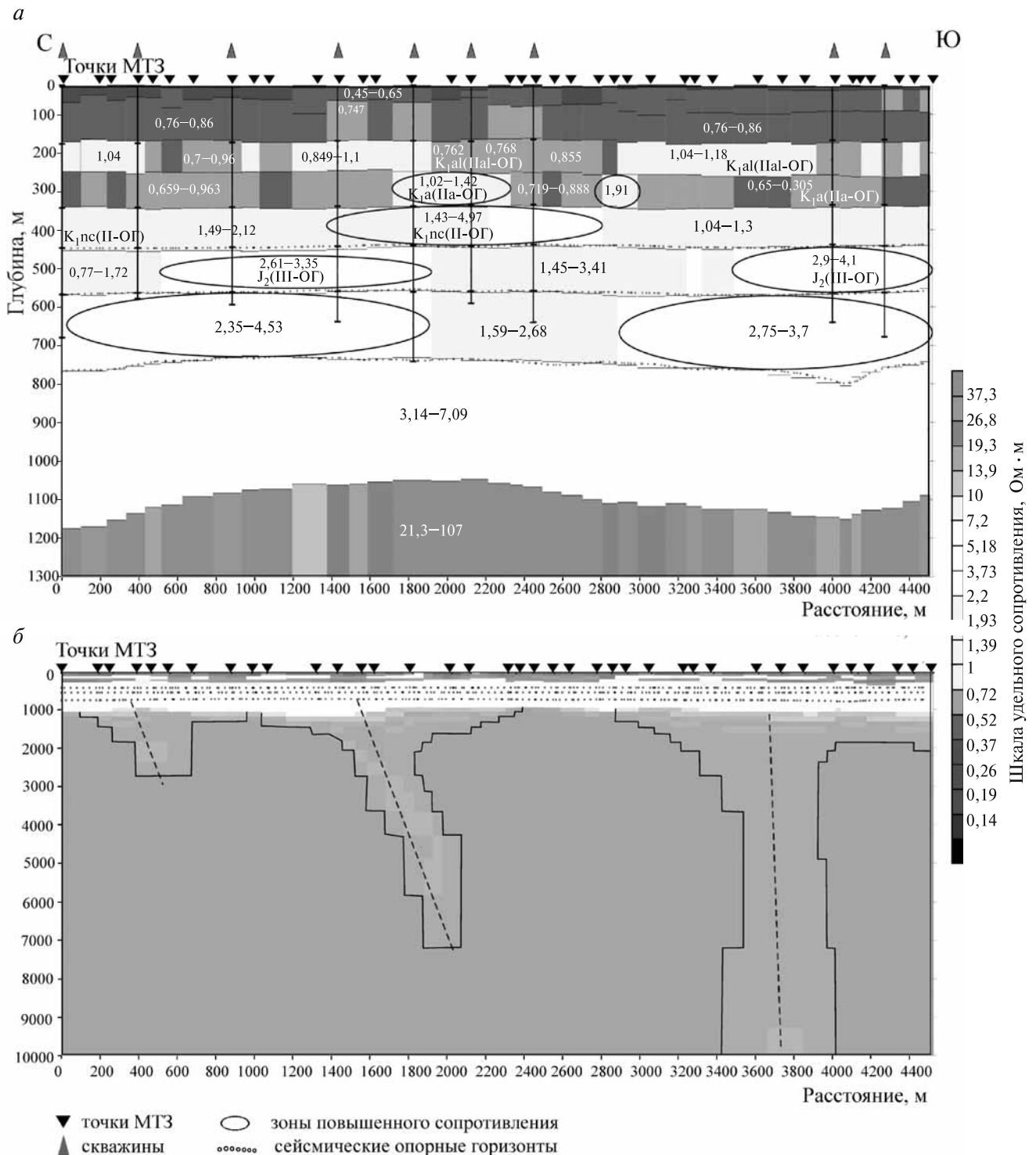


Рис. 5. Результаты интерпретации данных МТЗ по верхней (а) и нижней (б) частям разреза по профилю 1

При построении прогнозных литологических разрезов песчано-глинистых юрско-меловых отложений использованы классические петрофизические зависимости, которые в общем виде представлены на номограммах в работе [Рыжов и др., 1990].

Судя по представленным на рис. 4 графикам, на площади исследований во всем диапазоне изученной глубины песчаники имеют сопротивление немного выше, чем глины. Соответственно можно

предположить, что в районе работ грунтовые воды имеют среднюю минерализацию. Результаты анализа отобранных проб в скважинах показали, что минерализация в районе работ колеблется, как правило, от 20 до 30 г/л, но в нескольких пробах минерализация составляет 80 г/л.

Отложения подстилающих юрско-меловых пород менее изучены. Терригенные пермотриасовые отложения имеют сравнительно высокое сопротивление ($n \cdot 10$ Ом·м). Зоны пониженных

значений сопротивления связаны, как правило, с тектоническими структурами в районе месторождения.

Комплексная интерпретация сейсмических, электрометрических и ГИС-данных проведена с использованием современных программ российской компании «Северо-Запад».

Верхняя часть геоэлектрического разреза до глубины 1300 м получена в результате одномерной послойной интерпретации. Она характеризует изменение удельного электрического сопротивления мезозойско-кайнозойской геологической части разреза. На разрезе (рис. 5) показаны опорные сейсмические горизонты и данные, полученные из разведочных скважин, которые использованы в процессе подбора геоэлектрической модели.

Нижние геоэлектрические разрезы до глубины 10 км получены в результате двумерной инверсии. На них выявлены геоэлектрические неоднородности в палеозойской части разреза.

Исходя из обобщения и анализа данных, выделены и обоснованы перспективные на углеводороды интервалы разреза (рис. 5, а), на рисунке они выделены овалами.

Для палеозойской части разреза по результатам двумерной инверсии установлены две слабонаклонные зоны с пониженным сопротивлением (рис. 5, б), предположительно связанные с разрывными нарушениями. На этих участках уменьшение значений сопротивления незначительное, но оно имеет весьма устойчивый характер. Кроме того, на разрезе наблюдается относительно неглубокий «карман» с пониженным сопротивлением, природа которого не выявлена. В палеозойской части разреза в центральной части профиля обнаружена положительная высокоомная структура.

Чтобы на представленных разрезах выделить перспективные зоны в мезозойской части разреза, проанализированы скважинные данные в пределах исследуемых участков (результаты индукционного каротажа, как самого близкого к методу МТЗ) и характер флюидонасыщения. В результате в пределах перспективных структур, выделенных по данным бурения и каротажа сква-

жин, на геоэлектрических разрезах обнаружены характерные аномальные ореолы увеличения электрического сопротивления. Кроме того, отчетливо проявляется латеральное изменение удельного электрического сопротивления в области этих аномалий и непосредственно в самой залежи (рис. 5, а). По-видимому, это связано с тем, что в течение длительного геологического периода над залежью образовалась шапка эпигенетически измененных пород за счет устремляющихся вверх потоков углеводородов и других флюидов, постепенно просачивающихся через покрывку, что приводит к уменьшению пористости и проницаемости терригенных пород за счет пиритизации и кальцитизации. В результате над залежью углеводородов наблюдается суммарная высокоомная аномалия повышенного сопротивления. В целом и сама залежь представляет собой высокоомный пласт, в подошве которого часто залегают низкоомные породы, заполненные высокоминерализованными водами. Этот пласт или комбинация пластов в благоприятных условиях могут быть зафиксированы электроразведочными магнитотеллурическими зондированиями в виде высокоомной аномалии.

Закключение. Показана эффективность применения МТ-зондирования в комплексе с сейсморазведкой и скважинными данными на исследуемом участке по опытному профилю 1 для решения поисковых задач. Комплексная интерпретация данных МТЗ, ГИС и сейсморазведки позволила уточнить геологическое строение мезозойских отложений. Охарактеризовано строение палеозойских отложений с выделением предполагаемых разрывных нарушений. Выделенные перспективные участки в мезозойских терригенно-осадочных комплексах горных пород генетически связаны с зонами тектонических нарушений. Совместно с данными ГИС оценена продуктивность выявленных сейсморазведкой структур и выделены участки профилей с улучшенными коллекторскими свойствами. На основании результатов МТ-исследований даны рекомендации для дальнейших детальных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Даукеев С.Ж., Воцалевский Э.С., Пилифосов В.М. и др. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана // Нефть и газ. Т. III. Алматы, 2002.

Истекова С.А., Умирова Г.К. Особенности использования сейсмических данных при изучении резервуаров Южно-Торгайского нефтегазоносного бассейна // Вестн. ГИН. Алматы, 2014.

Истекова С.А., Умирова Г.К., Байгазиева Г.Т. Методика интерпретации и результаты МТ-зондирования в пределах Каратон-Саркамьского блока Прикаспийской впадины в Казахстане // Тр. X Междунар. науч.-практ.

конф. «Научные перспективы 21 века. Достижения и перспективы нового столетия», Новосибирск, 17–18 апреля 2015 г. Новосибирск: МНИ «Educatio», 2015.

Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М. Опыт применения 3D-моделирования для интерпретации профильных данных магнитотеллурических зондирований // Мат-лы 2-й междунар. конф. «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем. (Памяти Сергея Николаевича Кулика)» 1–4 октября 2012 г., Институт геофизики имени С.И. Субботина НАН Украины. Киев, 2012. С. 74–79.

Рыжов А.А., Судоплатов А.Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и ис-

пользование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. М.: ВИЭМС, 1990. С. 27–41.

Умирова Г.К., Истекова С.А., Закария М. Эффективность комплексных геофизических исследований при

оценке нефтегазоносности Каратон-Саракамьского блока на юге Прикаспийской впадины: Мат-лы Междунар. Саппаевских чтений «Роль и место молодых ученых в реализации экономической политики Казахстана». Т. III. Алматы, КазНТУ, 2015.

Поступила в редакцию
25.03.2016