

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.837.211:553.98 (574)

РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА ОПОРНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОФИЛЯХ
КАРАТОН-САРКАМЫССКОГО БЛОКА В КАЗАХСТАНЕ

Г.К. Умирова, С.А. Истекова, И.Н. Модин*

Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева,
050013, Алматы, ул. Сатпаева, 22, Республика Казахстан

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Геологический факультет, Ленинские горы, 1, Россия

На основе обработки и интерпретации данных МТ-зондирования создана цифровая геоэлектрическая модель блока Каратон-Саркамыс, расположенного в южной казахстанской части Прикаспийской впадины. Построены геоэлектрические разрезы и структурные карты по геоэлектрическим горизонтам. Показана возможность эффективного применения МТ-зондирования в комплексе с данными сейсморазведки и ГИС для получения дополнительной информации о литологических и коллекторских свойствах нефтегазоносных комплексов.

Магнитотеллурические зондирования (МТ), нефтегазоносность, сейсморазведка, комплексная интерпретация, Прикаспийская впадина, нефть и газ.

RESULTS OF MAGNETOTELLURIC SURVEY ON REFERENCE GEOPHYSICAL PROFILES
OF THE KARATON-SARKAMYS BLOCK IN KAZAKHSTAN

G.K. Umirova, S.A. Istekova, and I.N. Modin

A digital geoelectric model of the Karaton-Sarkamys block located in the southern (Kazakhstan) part of the Caspian Depression has been elaborated on the basis of processing and interpretation of magnetotelluric-sounding data. Geoelectric sections and structural maps of geoelectric layers have been constructed. It has been shown that magnetotelluric sounding combined with seismic and GIS data can be efficiently used to obtain additional information about the lithologic and reservoir properties of petroleum plays.

Magnetotelluric (MT) sounding, petroleum potential, seismic prospecting, integrated interpretation, Caspian Depression, oil and gas

ВВЕДЕНИЕ

Каратон-Саркамысский тектонический блок расположен на стыке двух крупных тектонических элементов – юго-восточного борта Прикаспийской впадины и Северо-Устьюртской депрессии. Зона сочленения представляет собой сложнопостроенную шовную зону – палеозойский палеопрогиб, который обусловил не только сложность тектонического строения (выклинивание соли кунгурского яруса, пространственное расположения геологических тел в блоке), но и широко развитую смену условий седиментации и состав разновозрастных геологических образований [Даукеев и др., 2002].

Геолого-разведочные работы на блоке проводятся начиная с 20-х годов прошлого столетия. Но, несмотря на то, что регион является во многих отношениях детально изученным, отдельные принципиальные вопросы его геологического строения остаются дискуссионными вплоть до настоящего времени. При этом важнейшими являются вопросы стратификации нижней (додевонской и девонской) части осадочного чехла и формирование так называемых «аномальных» структур в девонско-каменноугольных отложениях, а также детальное изучение литолого-стратиграфической неоднородности надсолевого комплекса.

Для получения дополнительной геологической информации на участке исследований была проведена электроразведка методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Магнитотеллурические зондирования основаны на регистрации вариаций естественного переменного электромагнитного поля теллурических токов с периодом от долей секунд до суток. Физической основой МТЗ является скин-эффект, в соответствии с которым высокочастотные компоненты поля, не проникающие на большие глубины, несут информацию о поверхностной части разреза, а низкочастотные – о глубинных областях [Бердичевский, Дмитриев, 1991].

Результаты электромагнитных исследований (после обработки и интерпретации) представляются в виде геоэлектрических моделей среды, несущих информацию о физических и геологических свойствах изучаемого разреза (проводимости, литологии, флюидонасыщенности и др.) [Hoversten, 2012].

При поисках углеводородов МТЗ эффективно дополняет сейсморазведочные и буровые исследования, позволяя получить дополнительную информацию при решении структурных задач, о литологической неоднородности и коллекторских свойствах горных пород. Большая глубинность зондирования обуславливает возможность применения метода для изучения глубоких горизонтов осадочного чехла [Бердичевский, 1950; Ингеро́в, 2014].

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

На территории Казахстана начиная с 2005 г., электроразведочные исследования проводятся силами ТОО «НПЦ «Геокен». Эта компания в 2012 г. провела полевые работы методом магнитотеллурического зондирования на блоке Каратон-Саркамыс. МТ-исследованиями решались следующие задачи:

- изучение и уточнение геологического строения надсолевого (триас и юрско-меловые отложения) и подсолевого комплексов блока Каратон-Саркамыс;
- выделение геоэлектрических неоднородностей в образованиях осадочного чехла и верхней части консолидированной земной коры с целью оценки их перспективности на нефтегазоносность;
- выделение аномальных зон проводимости осадочного чехла, благоприятных для аккумуляции углеводородов;
- подготовка рекомендаций по постановке последующих геолого-разведочных работ.

Осадочный чехол разведанного блока Каратон-Саркамыс сложный. Подсолевой комплекс разделяется на два структурных этажа: дойфельский и эйфельско-артинский. Бурением вскрыты отложения девона, представленные преимущественно глинистыми известняками. Выше залегают рифогенные отложения от турнейского яруса нижнего карбона до башкирского яруса среднего карбона. Завершают разрез подсолевого комплекса отложения ассельско-артинского яруса нижней перми, литологически представленные карбонатными и терригенно-карбонатными отложениями [Пилифосов, 2002].

Выше залегает соленосный комплекс кунгурского яруса, средняя мощность которого составляет 4.0 км.

Надсолевой разрез представлен полным комплексом геологических отложений, характерным для всей Прикаспийской впадины. Здесь установлены нефтяные горизонты в широком стратиграфическом диапазоне от палеогена до триаса включительно, представляющие собой три региональных нефтегазоносных комплекса: средневерхнетриасовый, средневерхнеюрский и нижневерхнемеловой.

Петрофизической особенностью осадочного чехла Прикаспийской впадины является наличие трех геоэлектрических комплексов: надсолевого с проводимостью от единиц до первых десятков сименс, карбонатно-галогенного с поперечным сопротивлением около 10^7 Ом·м² и продольной проводимостью в единицы См и подсолевого с проводимостью от единиц до 15–20 см. Кристаллический фундамент впадины характеризуется как очень высокоомная толща консолидированной коры. Высокое электрическое сопротивление плотных вмещающих пород осадочного чехла значительно отличается от сопротивления пластов-коллекторов. Насыщение коллекторов высокоминерализованными флюидами обуславливает четкую корреляцию электрических свойств горизонтов и их емкостных параметров. Для использования этих преимуществ в настоящий момент в районе исследования успешно апробирована методика электроразведки МТЗ. Однако наличие жесткого непроводящего экрана в виде соленосного комплекса иногда усложняет выделение подсолевых отложений одним методом МТЗ [Дмитриев, 1969; Ваньян, 1984; Кондратьев и др., 2002].

В результате ранее проведенных поисково-разведочных работ установлена промышленная нефтегазоносность как надсолевых, так и подсолевых отложений Каратон-Саркамысского блока. По надсолевому комплексу на блоке установлены 15 месторождений, залегающих на глубинах от 500 до 3200 м, с геологическими запасами нефти от 1 млн т (Карасор Западный) до 70 млн т (С. Нуржанов). В подсолевом комплексе в 1979 г. открыто одно из крупнейших в мире по запасам нефти месторождение Тенгиз (рис. 1).

Извлекаемые запасы Тенгизского и соседнего Королевского месторождений оцениваются от 750 млн до 1.1 млрд т нефти. Общие разведанные запасы в разбуренных и неразбуренных участках кол-

ляризующимися электродами РЕ-2, а вариации магнитного поля – с помощью индукционных датчиков. Использовалась центрально-симметричная прямоугольная дипольная установка с общим центральным электродом.

ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ

Обработка электроразведочных данных проводилась комплексами программ, разработанных компанией «Phoenix Geophysics Ltd» и ООО «Северо-Запад» и состояла из следующих этапов.

– Анализ частотных зависимостей в пунктах измерений МТ-параметров (импедансов). На этом этапе изучались амплитудные и фазовые кривые МТЗ; строились и анализировались частотные разрезы параметров тензора импеданса, карты амплитудных и фазовых полярных диаграмм тензора импеданса на характерных периодах, показывающих соответствие среды 1D, 2D или 3D модели.

– Трансформация МТ-параметров, позволяющая устранить или ослабить действие неоднородностей, расположенных в верхней части разреза (ВЧР).

Во время обработки данных вводилась поправка за магнитное склонение с целью ориентировки данных на географический север и восток.

На основе использования программы МТ-Corrector (ООО «Северо-Запад») были построены сплайны по частотным зависимостям компонент тензора импеданса и получены кривые кажущегося сопротивления. При построении сплайнов проводили автоматическую и ручную отбраковку значений, искаженных различного рода помехами. Затем проводилась сглаживающая сплайн-аппроксимация рассматриваемой частотной зависимости. Параметр сглаживания подбирали так, чтобы, с одной стороны, удовлетворить условию максимальной гладкости кривой, а с другой, – условию минимальной невязки сплайна и средних значений компоненты на каждом периоде.

На следующем этапе была проведена нормализация кривых МТЗ. Это процесс подавления влияния объектов, которые не могут быть учтены в рамках данной интерпретационной модели. В задачу нормализации, прежде всего, входит исключение влияния локальных приповерхностных неоднородностей. Данная процедура проводилась программным пакетом MTS PROF для всех кривых одновременно.

Нормализация позволяет эффективно бороться с приповерхностными неоднородностями, но не устраняет влияния локальных трехмерных объектов, находящихся на глубине и, соответственно, искажающих кривую на более низких частотах. Пример нормализованных кривых МТЗ представлен на рис. 2.

В процессе обработки были проанализированы разрезы параметров тензора импеданса.

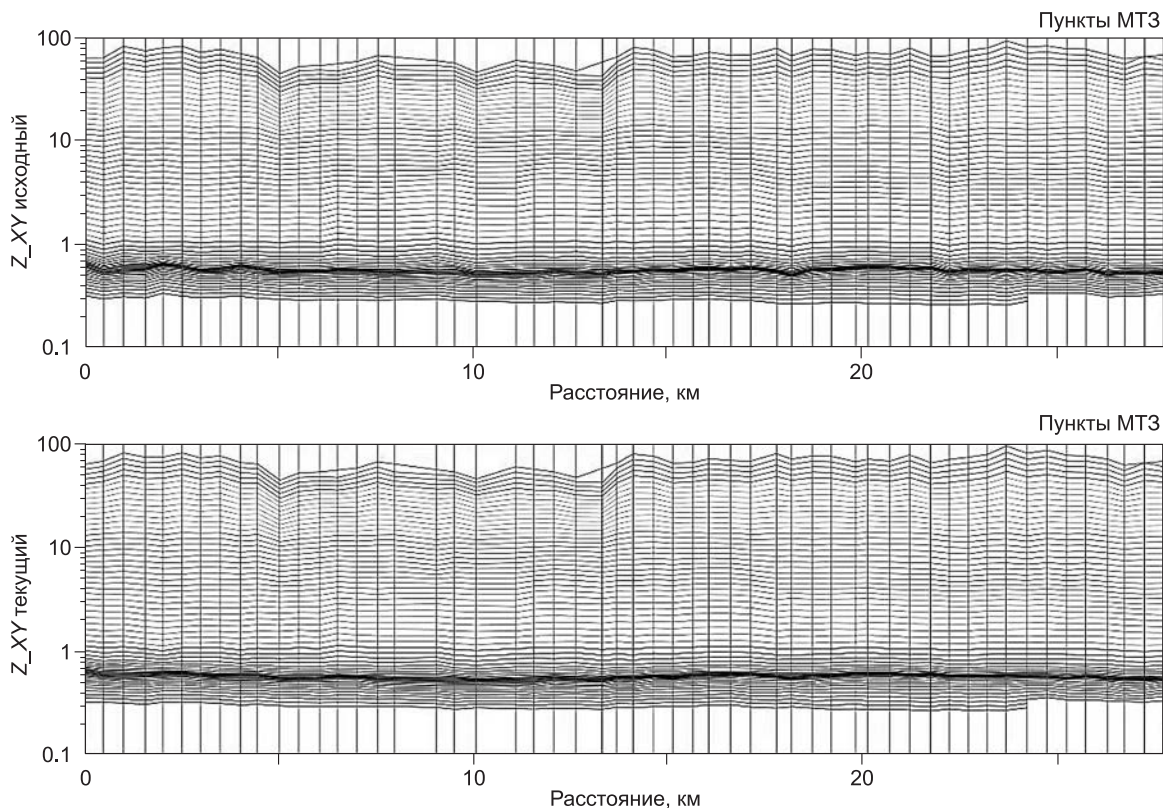


Рис. 2. Ручная нормализация кривых МТЗ по профилю.

– Значения параметра неоднородности Nmt , являющейся исходной точкой анализа в тесте М.Н.Бердичевского на различных периодах. Оценивая $|Nmt|$ оконтуриваются горизонтально-однородные $|Nmt| \leq \delta$ и горизонтально-неоднородные области $|Nmt| \geq \delta$.

– Параметры асимметрии Свифта $Skew S$ (амплитудный параметр) и Бара $Skew B$ (фазовый параметр).

Амплитудный параметр Nmt указывает на отличие геоэлектрического разреза от одномерного. В нашем случае параметр неоднородности Nmt составляет более 0.05—0.15. Анализ разрезов параметра Nmt показывает, что разрез в целом можно считать горизонтально-слоистым. Небольшое увеличение параметра отмечается на $\sqrt{T}$ более 10 с^{1/2}, что, по-видимому, связано с влиянием региональных неоднородностей. Амплитудный ($Skew S$) и фазовый ($Skew B$) параметры указывают на отличие геоэлектрического разреза от двухмерного ($Skew S$ и $Skew B$ более 0.05—0.15). Эти параметры превышают значение 0.15 в области региональных неоднородностей, выделенных на разрезах параметра Nmt . Это значит, что они носят двухмерный характер. Такая ситуация позволяет перейти от кажущихся сопротивлений по двум перпендикулярным направлениям (XY и YX) к среднегеометрическому сопротивлению (MN).

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ МТЗ

Процедура интерпретации электроразведочных данных состояла из двух этапов: количественной интерпретации кривых МТЗ с получением геоэлектрических разрезов и последующей геологической интерпретации геоэлектрических разрезов с построением геолого-геофизических разрезов и карт. Для построения геоэлектрической модели разреза и определения характерного сопротивления различных комплексов осадочного чехла широко привлекались данные каротажа и результаты бурения скважин.

Граф количественной интерпретации был выбран на основе проведенного анализа МТ-данных с целью детального расчленения геологического разреза. Поскольку в широком диапазоне частот кривые близки к одномерным, то для построения верхней части разреза была выбрана одномерная интерпретационная модель. Для выявления основных особенностей геоэлектрического строения осадочного чехла была выполнена одномерная инверсия среднеквадратичных кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса. Важным свойством среднеквадратичных кривых является их инвариантность, т. е. независимость от выбора системы координат, ориентации осей, установки. Среднеквадратичный импеданс Z_{rms} , применяемый в методе Ла Торакки-Маддена-Корринги, и соответствующие ему среднеквадратичные

кривые рассчитывались по формуле $Z_{rms} = \frac{1}{\sqrt{Z}} = \sqrt{\frac{|Z_{xx}|^2 + |Z_{xy}|^2 + |Z_{yx}|^2 + |Z_{yy}|^2}{2}}$, $\rho_{rms} = \frac{Z_{rms}^2}{\omega \rho_0}$. Для расчетов

использовалась программа автоматизированной инверсии MTS PROF INV, разработанная в ООО «Северо-Запад», при которой каждая кривая МТЗ переводилась в многослойный геоэлектрический разрез в рамках одномерной модели с последующей увязкой результатов по профилю. При этом из всех эквивалентных разрезов выбирали наименее контрастный.

Основное преимущество 1D-инверсии – возможность оперативно получить геоэлектрическую модель при минимуме априорной информации. Однако полученная модель отличается невысокой детальностью и не позволяет прогнозировать литолого-фациальную характеристику и коллекторские свойства разреза, оценить перспективы его нефтегазосности [Шуман, 2012]. Для решения этой задачи был выполнен одномерный ручной подбор с опорой на сейсмические разрезы и каротажные кривые.

Следующим шагом количественной интерпретации был одномерный ручной подбор по программе IPI_2D_WIN_MT. На этом этапе использовалась информация о геометрии основных сейсмических горизонтов, каротажные диаграммы по скважинам и результат автоматической 1D-инверсии как стартовая модель. Геологическая интерпретация проводилась по полученным разрезам сопротивлений на основе результатов обобщения скважинной информации.

На рис. 3 представлен геоэлектрический разрез по профилю А, полученный на основе инверсии, до глубины 13 км (см. рис. 3, а). Для полной визуализации разрезов на рис. 3, б показан схематический геолого-геофизический разрез, построенный по сейсмическим данным. На представленном геоэлектрическом разрезе достаточно четко можно выделить надсолевую, соленосную и подсолевую толщи.

Надсолевые отложения устойчиво дифференцируются по значениям удельного электрического сопротивления: четко разделяются на низкоомные и высокоомные пласты и хорошо коррелируются между собой.

Кровля соли является высокоомным горизонтом, УЭС которого значительно больше вышележащих пород, поэтому ее выделение является наиболее простой задачей для магнитотеллурических зондирований. На геоэлектрическом разрезе по профилю А наблюдается уверенная коррелируемость с отражающим горизонтом, характеризующий кровлю соли по сейсмическим данным. Некоторые несоответствия, возможно, объясняются тем, что в данной геологической ситуации кривые МТЗ обладают слабой

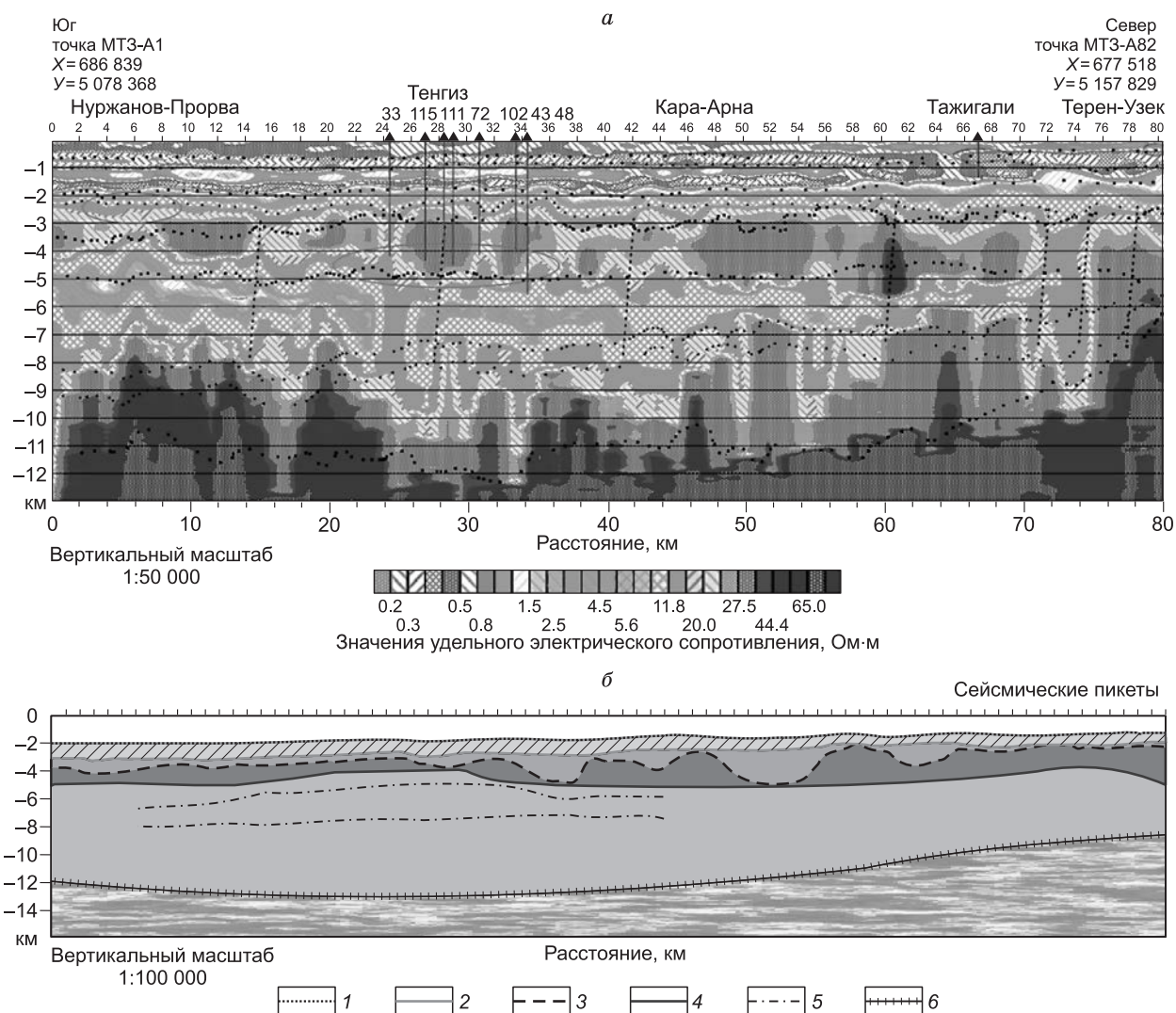


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю А (а), представленный совместно со схематическим геолого-геофизическим разрезом, построенным по сейсмическим данным (б).

1 — подошва меловых отложений по материалам МТЗ, III отражающий горизонт; 2 — подошва юрских отложений по материалам МТЗ, V отражающий горизонт; 3 — кровля соли Р1 кг по материалам МТЗ, VI отражающий горизонт; 4 — поверхность П2, кровля подсолевых отложений по материалам МТЗ; 5 — поверхность П2, кровля верхневизейско-нижнепермского комплекса по материалам МТЗ; 6 — поверхность фундамента по материалам МТЗ.

чувствительностью к высокоомным объектам под очень проводящей толщей осадков. Кровля фундамента по результатам МТЗ отбивается уверенно.

Стратиграфическая привязка геоэлектрических границ в процессе интерпретации выполнялась путем определения геоэлектрических неоднородностей разреза, соответствующих опорным и целевым стратиграфическим границам.

На этапе комплексной интерпретации, на участке Каратон-Саркамыс были широко использованы материалы ранее проведенных геофизических съемок [Мавричев, Озерков и др., 1994].

На первом этапе комплексной геологической интерпретации строились карты корреляции результатов каротажа скважин и геоэлектрических разрезов, построенных по результатам интерпретации МТЗ, составлялись таблицы соответствия выделенных геоэлектрических горизонтов с данными стандартного каротажа скважин. С помощью каротажных кривых по основным литологическим горизонтам месторождений региона осуществлялась литолого-стратиграфическая привязка по глубине построенных геоэлектрических горизонтов. Для стратиграфической привязки опорных геоэлектрических горизонтов была использована информация о глубине и результаты каротажа методом КС по скважинам из базы данных ТОО «НПЦ «Геокен».

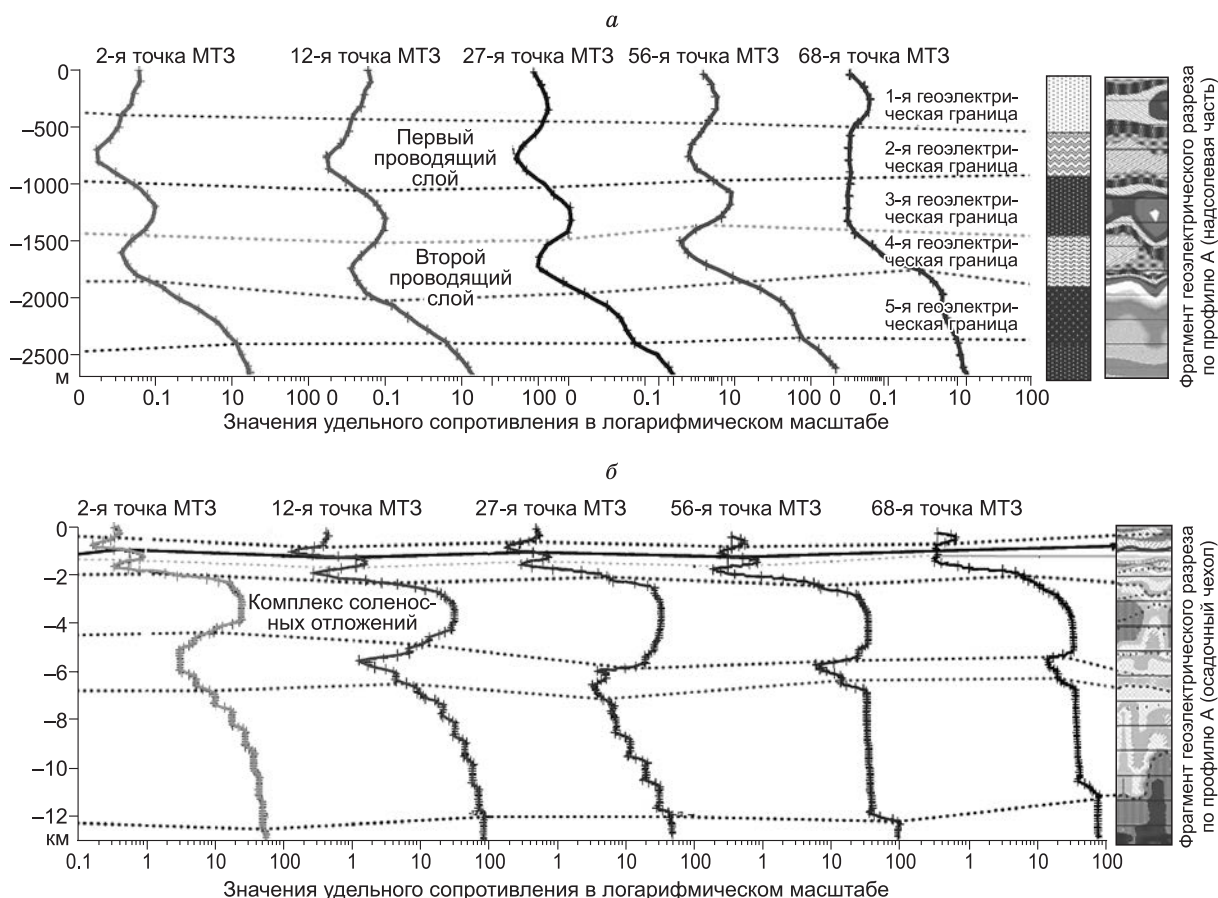


Рис. 4. Совокупность вертикальных срезов надсолевой толщи (а) и осадочного чехла (б) по профилю А.

Для увязки данных ГИС с электромагнитным полем, на кривых электрического каротажа выделялся хотя бы один репер, который хорошо прослеживался на разрезах МТЗ. Для выделения таких реперов по построенному в рамках 2D-инверсии геоэлектрическому разрезу через точки МТЗ 2, 12, 27, 56 и 68 профиля А были построены вертикальные срезы, которые условно были названы псевдокаротажными кривыми. Совокупность таких вертикальных срезов представлена на рис. 4. Анализ результатов МТЗ и скважинных данных позволил уверенно выделить на рассматриваемой площади границу раздела, которая связана с опорным отражающим горизонтом III, соответствующим подошве неоккома. В МТ-поле указанный горизонт прослеживается по минимуму МТ-кривой (см. рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На площади исследований по результатам интерпретации данных МТЗ создана цифровая геоэлектрическая модель Каратон-Саркамысского блока и построены геоэлектрические разрезы по шести профилям. По разрезам проведены процедуры трассирования, пикетирования, корреляционного прослеживания наиболее характерных горизонтов, где каждый горизонт выделяется сменой градиента УЭС. По каждому из полученных геоэлектрических горизонтов были построены карты УЭС.

Особенно эффективна геологическая интерпретация результатов МТЗ в комплексе с другими геофизическими методами, которая позволила выделить на площади Каратон-Саркамысского блока семь геоэлектрических горизонтов, хорошо коррелируемых на всех вертикальных срезах. Установлено четкое проявление горизонтальной слоистости надсолевых отложений, чего нельзя однозначно сказать о подсолевых отложениях. Анализ псевдокаротажных кривых надсолевой толщи Каратон-Саркамысского блока показывает, что в этих отложениях вполне уверенно выделяются четыре границы – стратиграфические маркеры, являющиеся кровлями пластов с некоторыми средними значениями УЭС и наличием хорошо проводящих слоев. После предварительной корреляции по *маркирующим геоэлектрическим горизонтам* была проведена послойная корреляция. Сопоставление и увязка выделенных геоэлектрических реперов производилась от верхнего репера к нижнему.

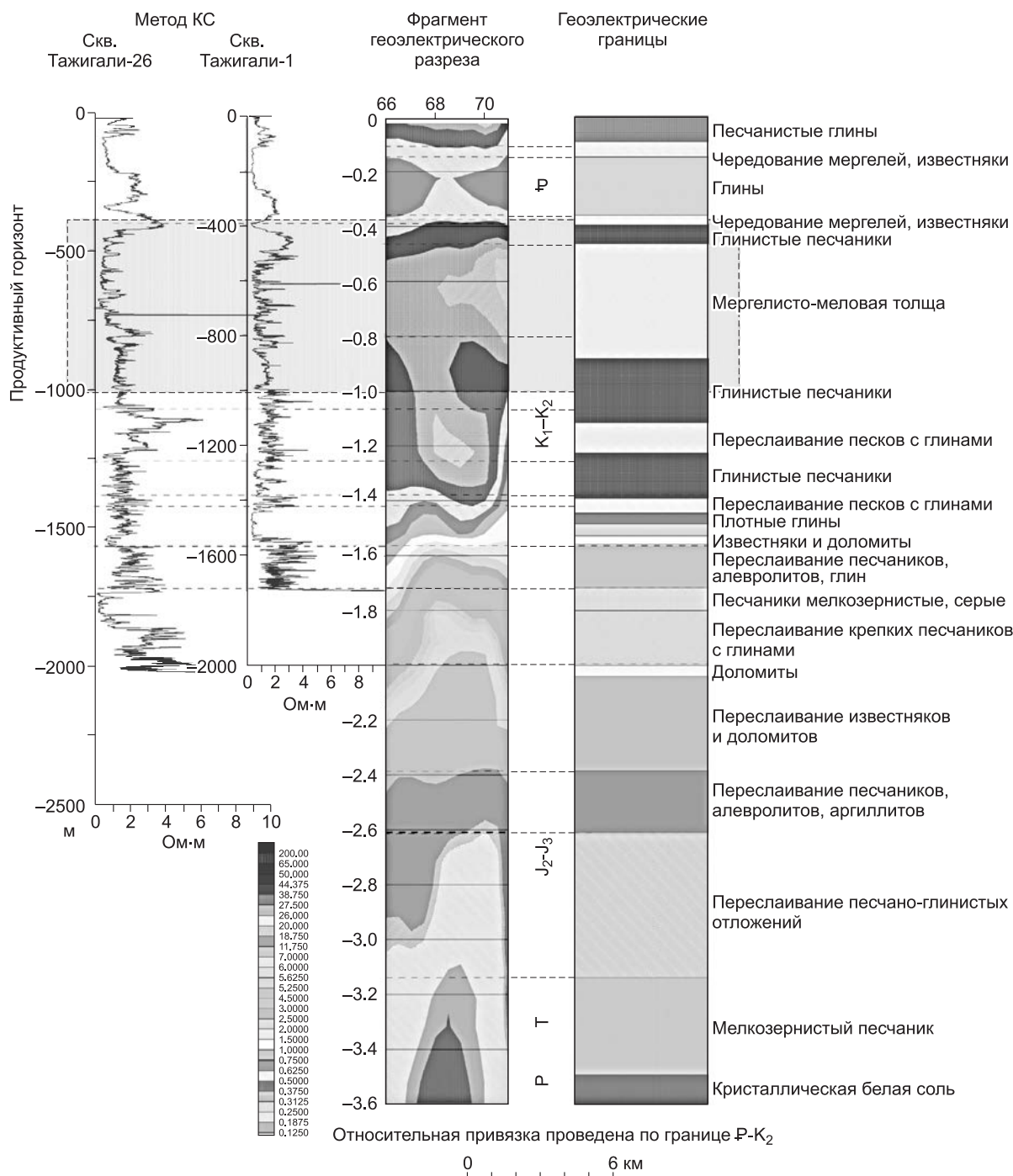


Рис. 5. Сопоставление геoeлектрического разреза надсолевой части осадочного чехла, сводной стратиграфической колонки и результатов индукционного каротажа (ИК) по месторождению Тажидали.

Основной задачей сравнения и корреляции кривых УЭС на всех шести профилях являлось выделение тех же слоев, пачек, пластов и горизонтов, что и на профиле А (см. рис. 4). Слои, пласты и горизонты прослеживались по сходству конфигураций каротажных диаграмм. Границы пластов и пачек выделялись так же, как и на профиле А, обязательно учитывая при этом каротажные диаграммы. В процессе такого сопоставления возникали случаи, когда корреляция нарушалась или в результате изменения мощности отдельного пласта, либо в результате выпадения из разреза какой-то скважины части пачек и слоев. В таких случаях каротажные диаграммы совмещались по кровле или подошве вы-

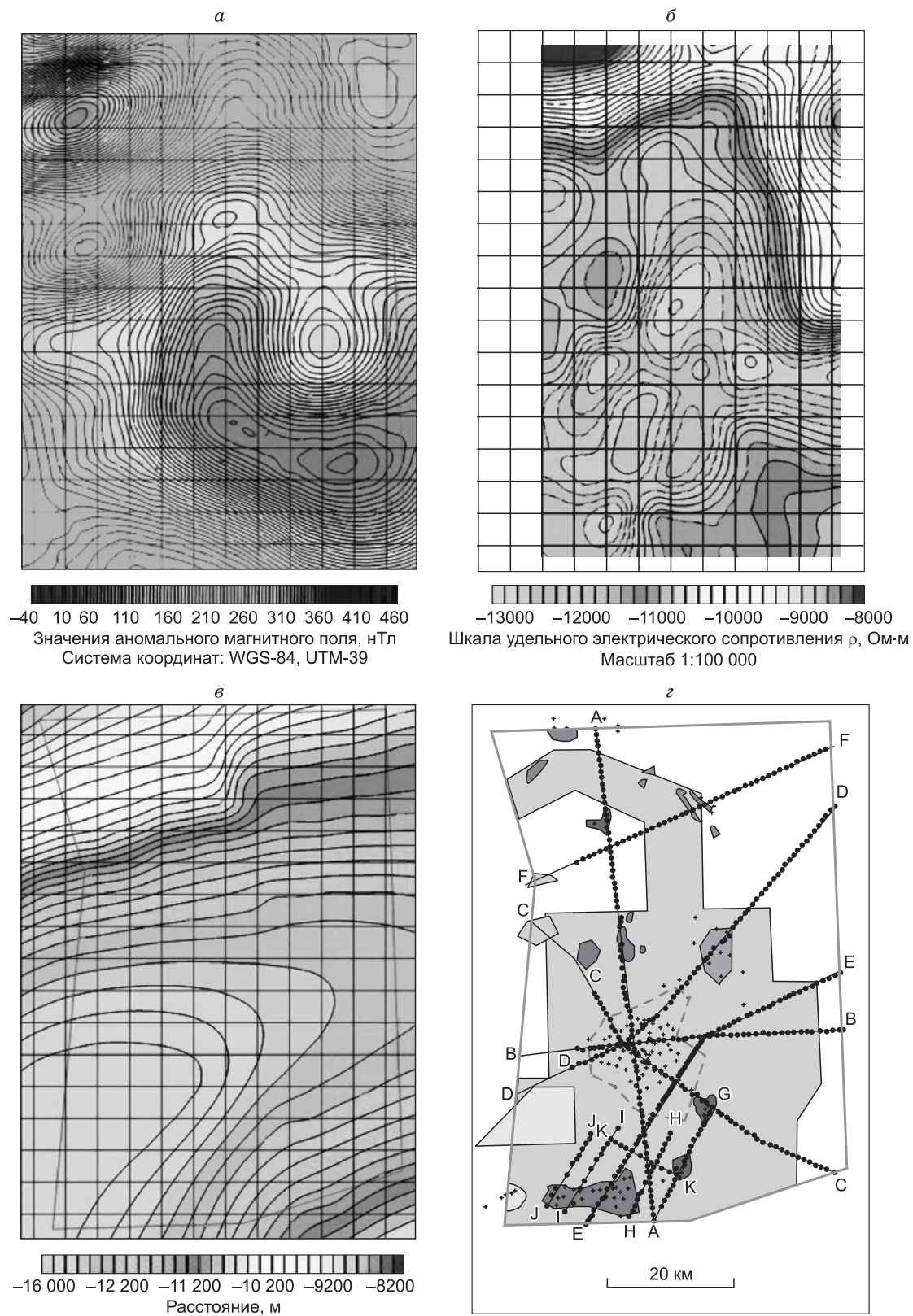


Рис. 6. Сопоставление результатов МТЗ с геофизическими данными.

а — карта аномального магнитного поля dTa ; *б* — карта УЭС по 10-му геоэлектрическому горизонту (кровля фундамента) по данным МТЗ; *в* — структурная карта по отражающему горизонту по кровле фундамента; *г* — схема расположения профилей.

шележащего геоэлектрического репера и от него прослеживались пласты сверху вниз до того места, где установлено нарушение корреляции. Тогда же выявлялись и причины таких нарушений.

Расчет распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) в пределах выделенных опорных геоэлектрических горизонтов был проведен с использованием определения среднего значения УЭС по горизонту (рис. 5).

Комплексный анализ МТЗ-данных, сопоставление их с результатами ранее выполненных сейсморазведочных, магнитометрических исследований, материалами бурения и каротажа скважин позволили уточнить геологическое строение и оценить перспективы нефтегазоносности как нижнепалеозойского, так и верхнепалеозойского комплексов регионов [Умирова, Истекова, 2014].

Сравнение сейсмического и геоэлектрического разрезов показывает хорошие возможности электроразведочных данных при решении структурных задач (таблица). На геоэлектрическом разрезе по профилю А, совмещенном с сейсмическим разрезом, выделенные геоэлектрические горизонты совпадают с условными горизонтами, выделенными по результатам интерпретации данных сейсморазведки. Так, вторая геоэлектрическая граница (ГЭГ) надежно увязывается с III опорным сейсмическим горизонтом. Пятая ГЭГ по глубине и морфологии совпадает с V опорным сейсмическим горизонтом. Седьмая ГЭГ совпадает с опорным сейсмическим горизонтом P_3 (см. рис 3).

На рис. 6 представлены карты аномального магнитного поля участка работ, карта УЭС по 10-му геоэлектрическому горизонту (кровля фундамента) и структурная карта по отражающему горизонту по кровле фундамента.

Таблица соответствия структурных и геоэлектрических горизонтов

Номера п/п	Структурный горизонт по данным сейсморазведки	Структурный горизонт, выделенный по данным интерпретации МТЗ
1	—	1—2
2	—	
3	—	3
4	III	4
5	V	5
6	VI	6
7	П1	7
8	П2	8
9	П3	
10	—	9
11	Ф	10

ВЫВОДЫ

На исследуемом участке по шести опытным профилям показаны результаты применения МТ-зондирований для решения геологических и поисковых задач. Комплексная интерпретация данных МТЗ, ГИС и сейсморазведки позволила уточнить геологическое строение осадочных отложений Каратон-Саркамысского блока, расположенного в южной казахстанской части Прикаспийской впадины.

В результате:

- 1) охарактеризовано строение палеозойских комплексов с выделением предполагаемых разрывных нарушений;
- 2) выделены перспективные участки в мезозойских терригенно-осадочных комплексах горных пород;
- 3) проведена оценка продуктивности выявленных сейсморазведкой структур и подтверждены участки профилей с улучшенными коллекторскими свойствами;
- 4) на основании результатов МТ-исследований даны рекомендации дальнейших детальных геологических работ.

Исследования, проведенные с использованием данной методики в последние годы по заказу частных нефтяных компаний в Казахстане, показали возможность значительного повышения эффективности нефтепоисковых работ. Результаты этих работ отличаются большой достоверностью и при оценке надсолевых и подсолевых структур, и в комплексе с сейсморазведкой позволяют дать практически однозначную оценку исследуемым объектам.

В целом электроразведка методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) является инструментом, который может успешно решать целый круг задач, связанных с поисками залежей углеводородов, выступая как существенное дополнение к сейсморазведке. Она позволяет оценить структурную обстановку, выявить специфические аномалии удельного сопротивления, связанные с эпигенетическими изменениями пород над залежью углеводородов, литологическое расчленение осадочных комплексов, решает задачи выделения глубинных разломов, структур фундамента, крупных антиклинальных поднятий, а также зон улучшенных коллекторных свойств изучаемых продуктивных пластов.

ЛИТЕРАТУРА

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. М., Недра, 1991, 250 с.

Ваньян Л.Л., Дебабов А.С., Юдин М.Н. Интерпретация данных магнитотеллурических зондирований неоднородных сред. М., Недра, 1984, 197 с.

Даукеев С. Ж., Воцалевский Э. С., Пилифосов В. М и др. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана. Алматы, Нефть и газ, т. III, 2002, с. 110—115.

Дмитриев В.И. Электромагнитные поля в неоднородных средах. М., МГУ, 1969, 131 с.

Ингеров О. Применение электроразведочных методов при поисках залежей углеводородов. Феникс Джеофизикс Лтд. Торонто, Онтарио, 2014.

Кондратьев В.А., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А., Пашевин А.М., Ольховик Е.А. Результаты применения новых технологий электромагнитных зондирований на юге Сибирской платформы. Разведка и охрана недр. М., Недра, 2004, № 8-9, с. 26—28.

Мавричев В.Г., Озерков Э.Л. Сейсмо-, электро-, магниторазведка – новая технология геофизических исследований на нефть и газ // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений, 1994, №11, с. 26—30.

Пилифосов В.М. Прикаспийская впадина. Сейсмостратиграфическая характеристика // Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана. Алматы. Нефть и газ, 2002, с. 50—61.

Тихонов А.Н. Об определении электрических характеристик глубоких слоев земной коры // Докл. АН СССР, Нов. Сер., 1950, т. 73, № 2, с. 295—297.

Умирова Г.К., Истекова С.А. Перспективы развития геофизических исследований на территории Казахстана // Материалы 8-й Казахстанско-Российской Международной научно-практической конференции «Математическое моделирование в научно-технологических и экологических проблемах нефтегазовой отрасли». Изд-во Атырауского института нефти и газа, 2014, с. 121—126.

Шуман В.Н. Современное электромагнитные зондирующие системы: состояние, тенденции развития, новые идеи, задачи // Материалы Второй Международной конференции «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем». 1–4 окт. 2012. Киев, Институт геофизики, с. 106—108.

Hoversten G.M., Morrison H.F., Constable S.C. 1998-Marine MT for petroleum exploration, Part II: Numerical analysis of subsalt resolution // Geophysics, 2012, v. 63, № 3, p. 826-840. <http://mah.icsd.edu/SEMC/SlideShow/- MT concepts>

*Рекомендована к печати 30 марта 2017 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 29 августа 2016 г.,
после доработки — 23 ноября 2016 г.*