



ДОРАЗВЕДКА НЕГЛУБОКИХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ И ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Н. Фаге¹, Н. М. Яркова², И. Н. Ельцов¹¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск; ²Сибгеоресурс, Кемерово

Мобильность, высокая информативность и эксплуатационная гибкость метода электротомографии дают возможность эффективно применять ее для доразведки уже эксплуатируемых угольных месторождений неглубокого залегания, особенно в складчатых зонах, при множественных нарушениях в пластах и их невыдержанности по мощности. Высокая разрешающая способность электротомографии позволяет выявлять особенности геологического строения, недоступные другим методам электроразведки. При этом существует ряд проблем при интерпретации данных метода, связанных как с особенностями работы электроразведки на постоянном токе, так и с традиционно используемым программным обеспечением. Основные программы для построения инверсии по данным метода электротомографии имеют двумерную постановку обратной задачи. Таким образом не учитываются объекты, находящиеся на удалении от профиля исследования, но влияющие на регистрируемые прибором сигналы. Следовательно, для корректной интерпретации данных метода электротомографии, особенно при работе на объектах, осложненных множественными тектоническими нарушениями, важно использование трехмерного прямого численного моделирования.

Ключевые слова: доразведка, электротомография, трехмерное численное моделирование, угольные месторождения неглубокого залегания, вертикальное электрическое зондирование.

SUPPLEMENTARY EXPLORATION OF SHALLOW COAL DEPOSITS BY ELECTRICAL TOMOGRAPHY METHOD AND 3D NUMERICAL SIMULATION

А. N. Fage¹, N. M. Yarkova², I. N. Eltsov¹¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk; ²Sibgeoresurs, Kemerovo

Due to its mobility, high informative value, and versatility, the electrical tomography method may be effectively applied to supplementary explore the shallow coal deposits that are being developed. It especially concerns those located in folded zones, with disrupted bedding and irregular thickness of beds. It should be noted that high resolution of electrical tomography allows identification of geological structure features that cannot be detected by other electrical methods. At the same time, there are some difficulties in interpretation of data acquired by the method, which is connected with both the nature of direct-current electrical survey and the software traditionally used. The main software used for simulating inversion based on electrical tomography method is characterized by 2D reverse problem statement. Thus, objects located remote from the survey profile but affecting the registered signals are not taken into account. Therefore, it is important to apply 3D numerical simulation for correct interpretation of data acquired by electrical tomography, especially when surveying objects complicated by multiple tectonic dislocations.

Keywords: supplementary exploration, electrical tomography, 3D numerical simulation, shallow coal deposits, vertical electrical sounding.

DOI 10.20403/2078-0575-2017-1-111-123

Уточнение параметров геологического строения на участках, осложненных множественными тектоническими нарушениями, потребует закладки множества линий разведочных скважин. При этом, например, на отдельных участках разреза «Барзасский» интервал между скважинами, достаточный для построения надежной геологической карты, на разведочной линии составит 20–30 м. Разумеется, с точки зрения финансовых и временных затрат такой межскважинный интервал не устроит компанию – разработчика месторождения.

В соответствии с этим исследование возможностей мобильного, высокоинформативного и гибкого метода электротомографии [11], дающего в сочетании с трехмерным численным моделированием

большой объем информации о геологическом строении [7, 9], представляет научный и практический интерес в приложении к месторождениям такой сложности, как Барзасское.

На угольном разрезе «Барзасский» особенно актуально использование трехмерного численного моделирования в качестве дополнения к методу электротомографии, поскольку ее данные в условиях складчатой зоны со множественными тектоническими нарушениями нуждаются в тщательном анализе и часто некорректно инвертируются стандартными программными средствами [2, 12]. В основном это связано с экстремальными углами падения пластов (30–45°), их сравнительно небольшими мощностями (2–6 м) и наличием коренных



пород, близких по значениям УЭС к углю. В данной ситуации единственно верным решением является верификация данных метода электротомографии при помощи корректного трехмерного численного моделирования для адекватных геоэлектрических моделей. Для выполнения модельных расчетов за приемлемое время необходимо использование специализированных вычислительных устройств и адаптированных под них алгоритмов. При исследовании использовался алгоритм И. В. Суроудиной [4, 10], разработанный для исполнения на графических процессорах nVidia с применением технологии CUDA.

Трехмерное моделирование для задач вертикального электрического зондирования и электротомографии сводится к моделированию распределения электрического потенциала точечного источника в сложно построенной среде. Представим потенциал электрического поля U в виде суммы аномального потенциала U^a и первичного потенциала U^0 , связанного с источником поля, расположенным в однородной среде с проводимостью σ^0 :

$$U = U^a + U^0. \quad (1)$$

Для аномального потенциала U^a справедливо уравнение Пуассона

$$\operatorname{div}(\sigma \nabla U^a) = -\operatorname{div}((\sigma - \sigma_0) \nabla U^0), \quad (2)$$

где $\sigma(x, y, z)$ – проводимость в среде.

При удалении от источника потенциал затухает как $1/R$, где $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, поэтому для функции U^a вдали от источников

$$U^a|_{x \rightarrow \pm \infty} = 0, U^a|_{y \rightarrow \pm \infty} = 0, U^a|_{z \rightarrow \pm \infty} = 0.$$

Дискретизация уравнения (1) конечно-разностным методом [3] и последующая его симметризация приводят к системе линейных алгебраических уравнений

$$AU^a = b, \quad (3)$$

где A – действительная, симметричная, сильно разреженная, положительно определенная матрица; b – столбец свободных членов.

После решения системы (2) получим аномальный потенциал. Затем с помощью уравнения (1) находим полный потенциал. Для нахождения разности потенциалов в приемных электродах и кажущегося сопротивления необходимо решить несколько таких задач для различного положения токовых электродов. Для решения систем линейных уравнений (2) был выбран итерационный метод сопряженных градиентов (CG), поскольку в данном случае мы имеем разреженные симметричные матрицы больших

размеров (от 1,5 до 2,5 млн сеточных узлов). Для повышения скорости сходимости был использован оригинальный подход построения предобуславливающей матрицы на основе аппроксимации обратной матрицы, предложенный в [6], и библиотека функций CUBLAS CUDA NVIDIA. В результате мы получили полностью параллельный алгоритм метода PCG (Preconditioned Conjugate Gradient), максимально использующий возможности графических процессоров [5].

Итак, использование метода электротомографии с его высокой разрешающей способностью и оперативного трехмерного численного моделирования на графических ускорителях актуально для доразведки угольных месторождений неглубокого залегания. Совместно с данными разведочных скважин, зарегистрированных в Госкомитете по запасам (ГКЗ), указанные методы способны значительно повысить оперативность и качество доразведки.

Описание метода

Электротомография – модификация проверенной временем технологии вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). За счет применения многоэлектродной установки с ее зондирующим эффектом достигается высокая разрешающая способность. Глубина исследования зависит от геометрического параметра установки, в данном случае для используемых схем Шлюмберже и поль-диполь, отношение глубины к длине электроразведочной линии приблизительно равно 1:5 и 1:3 соответственно. Таким образом, для имеющегося оборудования (автоматическая электроразведочная станция СКА-ЛА-48) максимальная глубина исследования при работе 5-метровыми косами (общая длина установки 235 м) составляет 47 м для схемы Шлюмберже и 80 м для схемы поль-диполь с выносным электродом. Увеличение глубины исследования связано либо с увеличением расстояния между электродами на электроразведочной косе и, как следствие, с пропорциональным падением вертикальной разрешающей способности, либо с использованием большего количества электродов на косе, что сопряжено с существенным удорожанием оборудования. Опыт работы показывает, что применяемая аппаратура позволяет получить достаточную для большинства разрабатываемых открытым способом месторождений глубину исследования, при этом не теряет чувствительность к экономически оправданным для разработки угольным пластам (от 3 м). Метод хорошо работает на участках, где угольные пласты и вмещающая их порода соседствуют с мощными водоносными горизонтами, как правило, низкоомными, что позволяет получать контрастные по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) разрезы. Как известно [2], для геологических разрезов на угольных месторождениях Кемеровской и Новосибирской областей характерны различия



в значениях УЭС до одного порядка (значения УЭС глин и суглинков составляют 30–50 Ом·м, угольных пластов – 350–600 Ом·м), что предопределяет перспективность метода электротомографии для работы на данных объектах.

До настоящего времени в Кемеровской области для разведки угольных месторождений и оценки их параметров в основном используются традиционные методы – бурение и скважинный каротаж. Хотя они и наиболее точные, но весьма дорогие и требуют существенных временных затрат. Применение электротомографии позволяет сократить расходы на бурение сетки разведочных скважин, поскольку дает возможность построить предварительную геологическую карту месторождения, а также использовать бурение лишь для привязки к реальным геологическим условиям и уточнения отдельных, наиболее сложных и перспективных участков.

Исследование угольных пластов выполнялось на двух участках действующего разреза «Барзасский» в Кемеровской области:

1. Незазведанный южный участок. Работы производились в 2013 г. с использованием аппаратного комплекса СКАЛА-48 [1]. В 2014 г. были получены данные вскрытия исследованного участка и, как следствие, появилась возможность соотнести реальную геологическую обстановку с результатами геофизических работ.

2. Разведанный и частично вскрытый западный участок, на котором верхний слой четвертичных отложений был удален, угольные пласты обнажены. Работы производились в 2015 г. также с использованием аппаратного комплекса СКАЛА-48.

Исследование методом электротомографии выполняется по существующим разведочным линиям скважин, при этом сами скважины выступают в качестве опорных точек, а геологическое строение в интервале между ними корректируется по данным геофизики: высокая разрешающая способность метода позволяет выявлять особенности строения геологической среды, пропущенные при разведочном бурении.

Полученные данные полевых измерений эффективно верифицировались данными трехмерного численного моделирования на графических процессорах: проводилась оценка влияния геологических особенностей (высокие контрасты значений УЭС, сложные геологические условия, ярко выраженные водоносные горизонты) на информативность получаемых геоэлектрических разрезов.

Геологическая характеристика участка работ

Метод электротомографии для прогноза положения угольных пластов применен на Барзасском участке Глушинского месторождения каменного угля. По результатам исследования Н. М. Ярковой, угленосная толща представлена литифицированными



Рис. 1. Перекрытие угольного пласта песчано-глинистыми породами. Борт карьера на угольном разрезе «Барзасский»

ми песчано-глинистыми породами с пластами угля и слоями углистых пород (рис. 1).

Тектоническое строение участка очень сложное с высокой тектонической и пликативной нарушенностью (рис. 2). В соответствии с классификациями запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых по сложности геологического строения участок относится к третьей группе сложности.

В структурно-тектоническом отношении Барзасский участок представляет собой фрагмент тектонического блока, взброшенного нарушением I-I (рис. 2, 3). Апофизами последнего являются нарушения, развитые на площади блока.

Сложное тектоническое строение участка отражается в высокой нарушенности угольных пластов, в том числе пласта Волковский, содержащего большую часть запасов угля месторождения. Серией нарушений пласт разбивается на неправильные блоки, изолированные по площади. По данным исследования скважин такие блоки могут быть представлены как повторяющиеся части пласта разной мощности. Подобные блоки ограничены по площади малоамплитудными нарушениями, и их корреляция с аналогичными нарушениями через 100–600 м обычно невозможна. При интерпретации данных по скважинам такие осколки пластов часто позиционируются в зонах нарушенных пород (рис. 4, 5) и между собой не увязываются. В дальнейшем при ведении открытых горных работ части пласта вскрываются и уголь извлекается (рис. 6).

Геолого-разведочными работами на участке Барзасский установлено наличие горизонтов водонасыщенных, сильно обводненных пород, приуроченных к зонам развития трещин выветривания до 120 м от поверхности и к зонам нарушенных пород. Современные четвертичные отложения, перекрывающие коренные углевмещающие породы, увлажнены, но обладают низкой водообильностью.

Строение угольных пластов, предназначенных к разработке, от простого до сложного (1–11 пачек

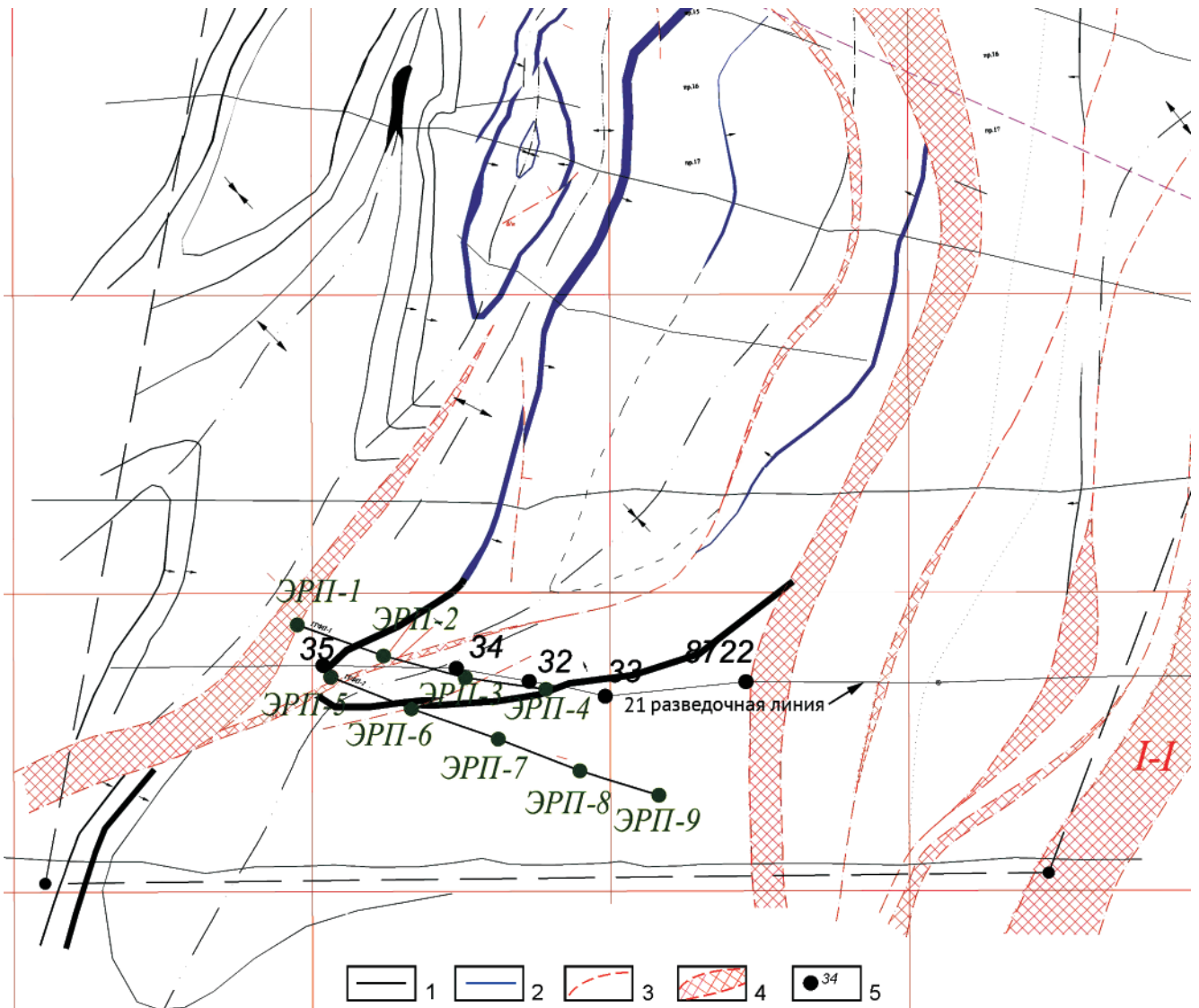


Рис. 2. Тектоническая схема участка «Барзасский»

Пласт: 1 – не отработанный, 2 – отработанный; 3 – границы тектонических нарушений; 4 – зоны тектонических нарушений; 5 – разведочные скважины и их номера

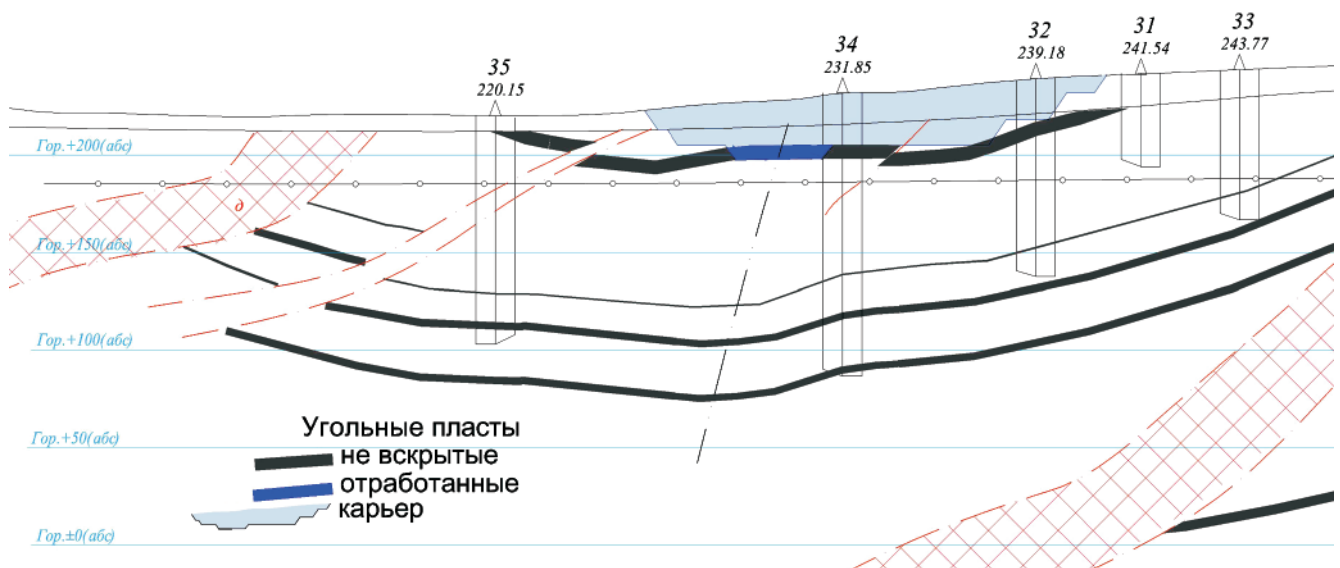


Рис. 3. Геологический разрез по 21-й разведочной линии

Усл. обозн. см. на рис. 2

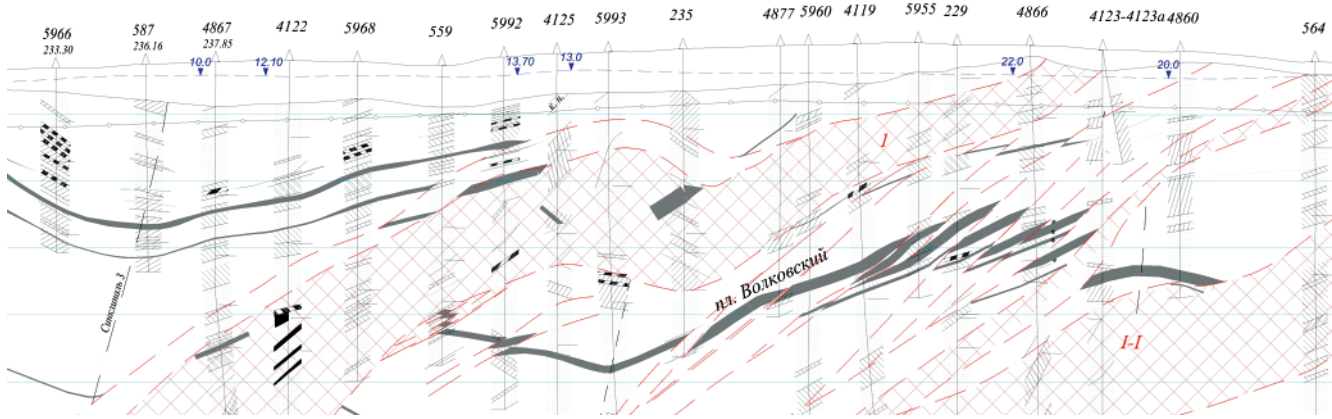


Рис. 4. Геологический разрез по V разведочной линии
Усл. обозн. см. на рис. 2

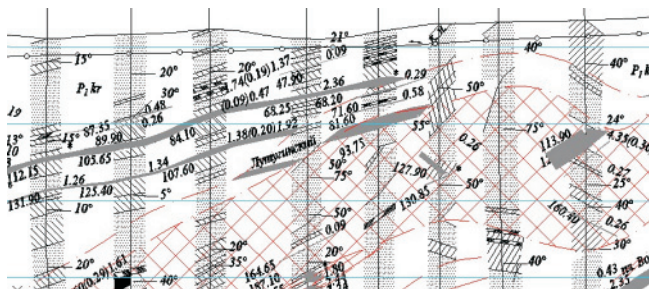


Рис. 5. Фрагменты пластов в зоне нарушения I-I
Усл. обозн. см. на рис. 2



Рис. 6. Пласт «Волковский» (темные участки на фотографии) в зоне нарушения «Г»

угля). Пласты в основном не выдержаны. Мощность пластов в среднем 0,74–6,14 м. Основной разрабатываемый пласт сложного строения (Волковский) относительно выдержан по мощности (4,13–6,82 м).

В настоящее время разрез «Барзасский» – действующее предприятие с годовой добычей 1 млн т в год. Глубина вскрытия карьера 50 м от поверхности (горизонт +150 м).

Значительный объем эксплуатационной разведки выполнен севернее 21-й разведочной линии. В 2011–2012 гг. разрезом пройдено более 3700 пог. м бурения (53 скважины), разведочная сеть уплотнена до 100 м между профилями. Это позволило до вскрытия горными работами с высокой достоверностью определить положение пласта. В то же время южная часть остается наименее разведанной и тектонически наиболее сложно построенной. Для однозначной трассировки угольного пласта в южной части участка необходимо дополнительное уплотнение разведочной сети. Но, как

уже было отмечено, при высокой тектонической нарушенности уплотнение сети скважин не дает необходимой достоверности при интерпретации полученных результатов. Проведение площадных геофизических исследований является решением данной задачи.

Исследования на южном участке разреза «Барзасский»

В 2013 г. были проведены экспериментальные работы с использованием метода электротомографии на южном участке разреза «Барзасский». Подготовительная фаза работ включала в себя знакомство с данными геологоразведки и планирование электроразведочных линий относительно направления простирания пластов. Перед началом геофизических исследований в непосредственной близости от участка работ для лабораторных анализов были отобраны образцы горной породы (алевролит и каменный уголь). По данным бурения на южном участке было известно общее направление простирания пластов и угол их падения, однако точная граница верхней кромки пласта разведочным бурением не была определена. По результатам анализа априорной информации было принято решение расположить электроразведочные линии в направлении с запада на восток таким образом, чтобы они оказались перпендикулярны предполагаемой линии простирания наиболее мощного пласта «Волковский» (рис. 7). При этом ориентация профиля (при движении от начальной к конечной точке) совпадает с направлением падения пласта.

Аппаратура СКАЛА-48 эксплуатировалась в конфигурациях электроразведочной установки Шлюмберже и поль-диполь. Максимальная глубина исследования в конфигурации Шлюмберже составляла 47 м, поль-диполь – 80 м. При этом чувствительность к наклонным границам лучше в схеме поль-диполь, однако вертикальная разрешающая способность уступает таковой в схеме Шлюмберже. Предварительная обработка данных (оценка качества, фильтрация) осуществля-

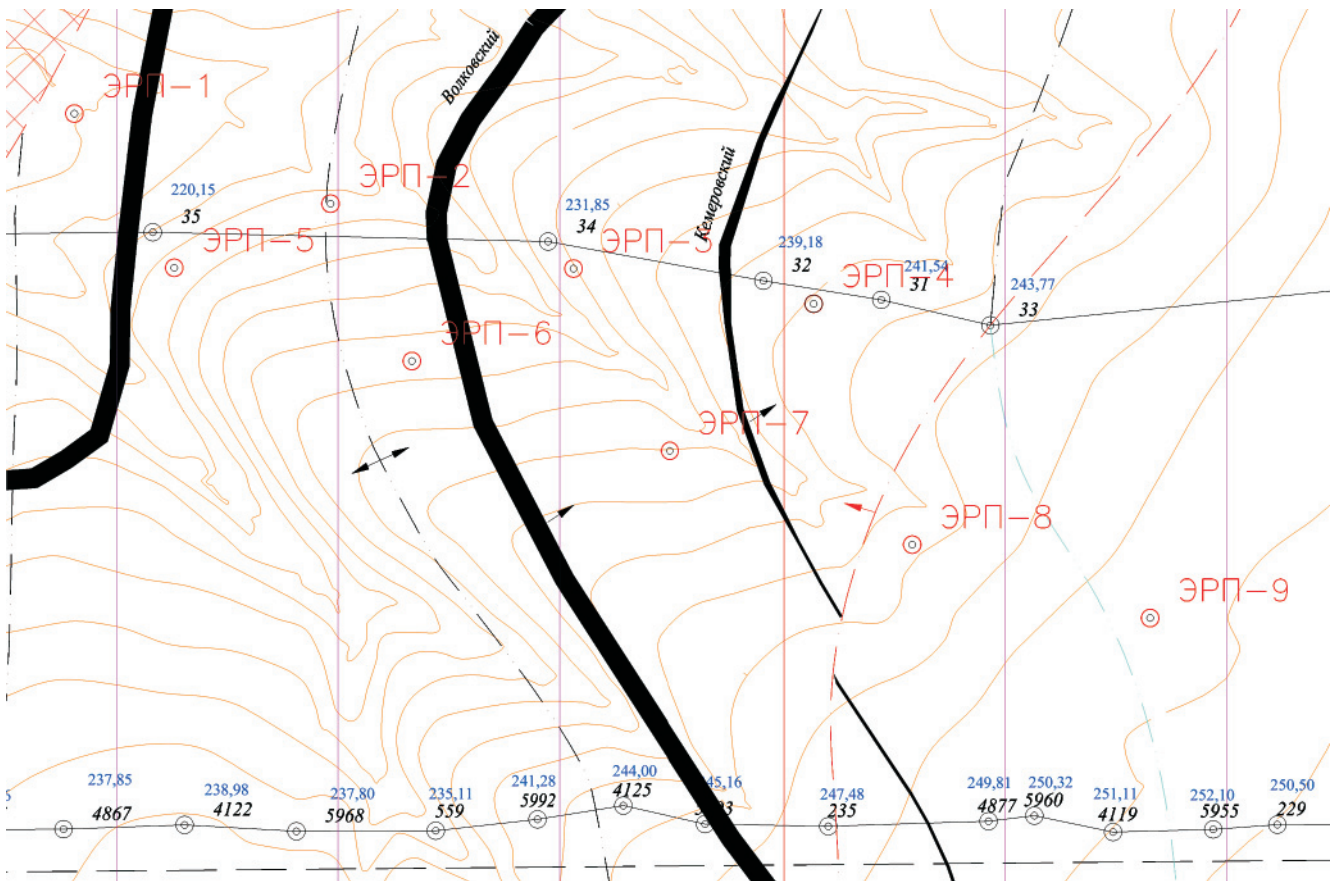


Рис. 7. Схема расположения электроразведочных линий (ЭРП-1-4 и ЭРП-5-9) на южном участке разреза
Усл. обозн. см. на рис. 2



Рис. 8. Электроразведочная станция СКАЛА-48 в момент проведения измерений на южном участке разреза

лась в программе SiberTools. Инверсия данных выполнялась при помощи программы Res2DInv [11], визуализация геоэлектрических разрезов – в программе Golden Software Surfer [8]. Электроразведочные линии располагались на очищенном от леса участке, при этом почвенно-растительный слой снят не был (рис. 8), условия заземления были хорошими (сопротивление заземления не превышало 2 кОм), а качество полученных данных, как следствие, – высоким.

В результате инверсии данных, полученных методом электротомографии, были построены охарактеризованные далее геоэлектрические разрезы.

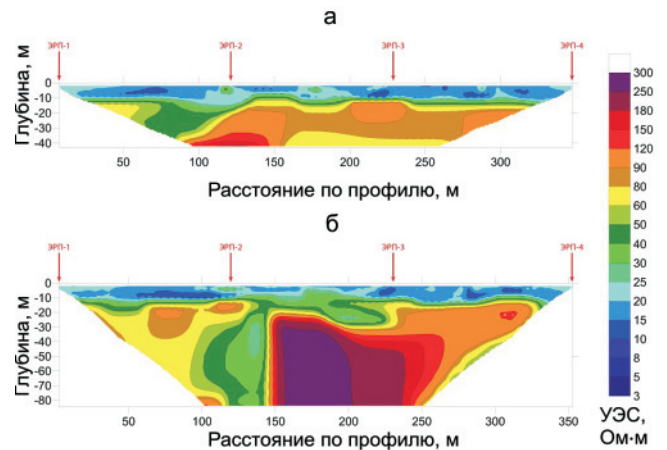


Рис. 9. Геоэлектрические разрезы по профилю ЭРП-1-4, полученные в результате инверсии данных исследования методом электротомографии на южном участке разреза, полученные с использованием установок Шлюмберже (а) и поль-диполь (б)

Интерпретация геоэлектрических разрезов по ЭРП-1-4 позволила сделать вывод о мощности четвертичных отложений (10 м), а также о возможном наличии тектонического нарушения в интервале 120–150 м по профилю ЭРП-1-4 (рис. 9). С учетом имеющейся априорной информации было сделано предположение о глубине и характере залегания угольного пласта (рис. 10). Смещение вправо области высоких УЭС на геоэлектрическом разрезе, полученном с использованием установок поль-диполь,

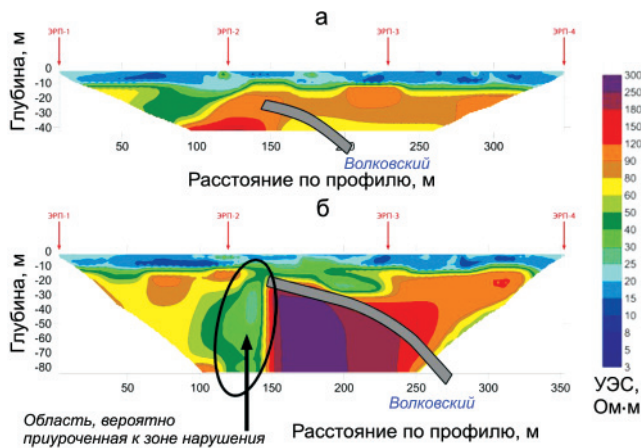


Рис. 10. Геоэлектрические разрезы по профилю ЭРП-1-4 с предположением по расположению Волковского угольного пласта, полученные с использованием установок Шлюмберже (а) и поль-диполь (б)

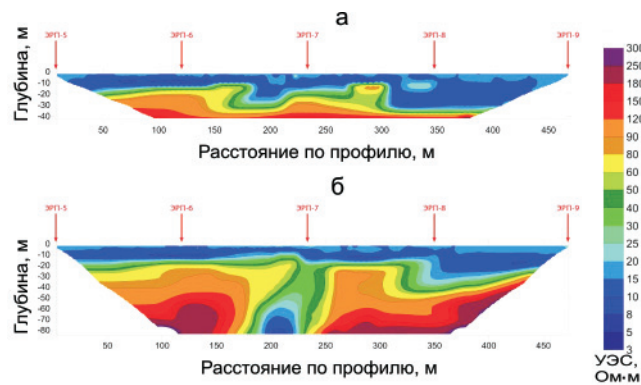


Рис. 11. Геоэлектрические разрезы по профилю ЭРП-5-9, полученные в результате инверсии данных исследования методом электротомографии на южном участке разреза, полученные с использованием установок Шлюмберже (а) и поль-диполь (б)

относительно разреза, полученного с использованием установки Шлюмберже, объясняется особенностью последней: наклонные границы «растягиваются». Таким образом, при определении точного места нарушения были использованы данные установки поль-диполь.

Геоэлектрический разрез, построенный по результатам инверсии данных метода электротомографии профиля ЭРП-5-9 (рис. 11) позволил выделить предполагаемую зону тектонического нарушения (инт. 220–250 м) на разрезе, полученном с использованием установки поль-диполь. При этом аналогично профилю ЭРП-1-4 на геоэлектрическом разрезе, полученном с использованием установки Шлюмберже, данная зона нарушения сдвинута влево (инт. 170–200 м) и проявляется менее явно.

Выводы о наличии или отсутствии угольных пластов на геоэлектрическом разрезе по профилю ЭРП-5-9 сделать не удалось, поскольку такого явного разделения исследуемой среды по значению УЭС, как на геоэлектрическом разрезе по профилю ЭРП-1-4, не наблюдается.

В результате исследования образцов горных пород в лаборатории (измерения проведены Н. А. Голиковым) получены следующие значения УЭС (Ом·м): алевролит: сухой 158, увлажненный 109, каменный уголь 445 и 370 соответственно

Как и предполагалось, каменный уголь марки СС (слабоспекающийся), характерный для продукции разреза «Барзасский», обладает достаточно высокими значениями УЭС. Однако контраст между вмещающей породой (алевролит) и каменным углем невелик. С учетом относительно малой мощности пластов (3–5 м) по отношению к расстоянию между электродами в используемой электроразведочной установке (5 м), разница в 3 раза между УЭС угля и алевролита невелика. В связи с этим возник вопрос о возможности достоверного определения наличия или отсутствия угольного пласта на фоне вмещающей породы, имеющей близкие электрические свойства. Для этого было применено трехмерное численное моделирование на графическом процессоре.

Исследования на западном участке разреза «Барзасский»

В 2015 г. экспериментальные работы выполнялись на западном участке разреза «Барзасский» (рис. 12).

Данный участок был частично вскрыт, угольные пласты в низшей точке участка обнажены (рис. 13). С учетом этих сведений решение о расположении профилей принималось на месте выполнения ра-



Рис. 12. Западный участок разреза

1 – профили: а – 1, б – 2; 2 – точки, вынесенные на геоэлектрические разрезы на рис. 14, 16; 3 – точка съемки фотографии на рис. 13

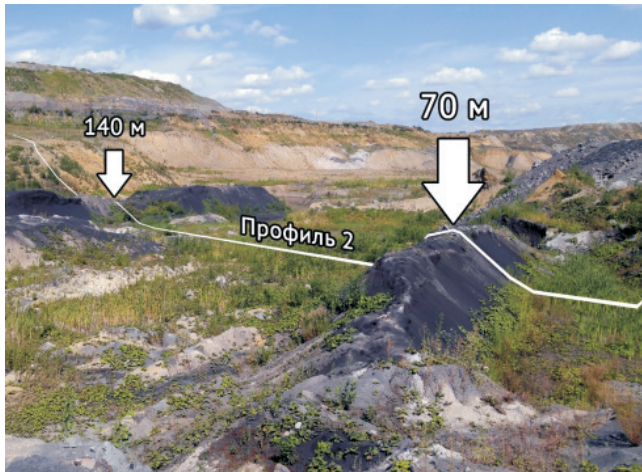


Рис. 13. Фотография западного участка с нанесенным профилем 2 (темные гребни – обнажения угольных пластов)

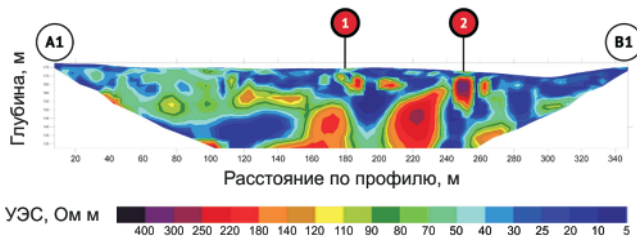


Рис. 14. Геоэлектрический разрез по профилю 1, полученный в результате совместной инверсии (Шлюмберже, диполь-диполь) данных исследования методом электротомографии на западном участке разреза

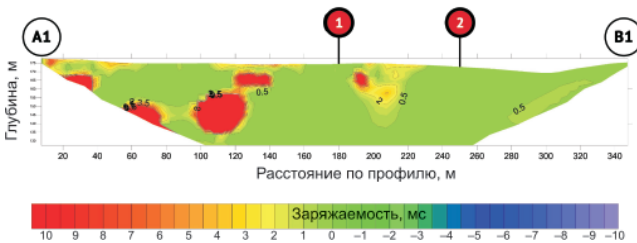


Рис. 15. Геоэлектрический разрез по профилю 1 (данные метода вызванной поляризации на западном участке)

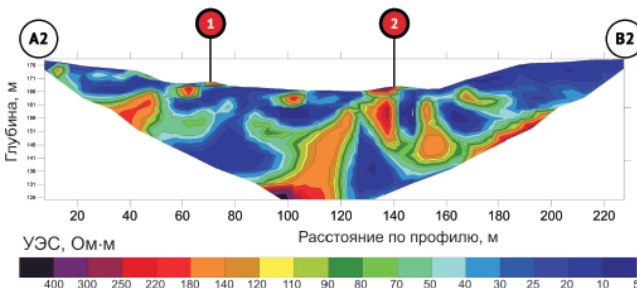


Рис. 16. Геоэлектрический разрез по профилю 2, полученный в результате совместной инверсии (Шлюмберже, диполь-диполь) данных исследования методом электротомографии на западном участке разреза

бот. Предварительная подготовка (работа с геологическим материалом, изучение карт) не проводилась.

Аппаратура СКАЛА-48 функционировала в конфигурациях электроразведочной установки Шлюмберже и диполь-диполь, глубина исследования 47 м. Как и в исследованиях 2013 г., для работы с данными использовались программы SiberTools, Res2DInv, Golden Software Surfer. Инверсия данных по двум электроразведочным установкам (Шлюмберже и диполь-диполь) выполнялась совместно. Таким образом, результат опирается на сильные стороны обеих установок. Условия заземления можно охарактеризовать как хорошие: электроды находились в увлажненной глине или окислившемся влажном угле, сопротивления заземления не превышали 1 кОм.

В результате инверсии данных были построены следующие геоэлектрические разрезы.

Полученный по профилю 1 геоэлектрический разрез может быть проинтерпретирован однозначно (рис. 14): рыхлые четвертичные отложения (сине-зеленая гамма), покрывающие пласты каменного угля (красно-оранжевая гамма). Верность такой интерпретации подтверждается данными, полученными по профилю 2 (рис. 15). Здесь картина аналогична геоэлектрическому разрезу по профилю 1 с той лишь разницей, что электроразведочная линия на участках 1 и 2 (красные метки на рис. 15) была заземлена непосредственно в обнаженный угольный пласт. Таким образом, работы 2015 г. показали, что отсутствие коренных пород на контакте с угольными пластами существенно упрощает задачу поиска последних. Стоит также отметить, что метод вызванной поляризации оказался неинформативным на данном объекте (рис. 16): повышенной поляризуемостью характеризуются лишь глинистые породы. Несмотря на отсутствие проблем с интерпретацией участка, исследованного в 2015 г., численное трехмерное моделирование также было выполнено и для него.

Результаты трехмерного численного моделирования

Геологические особенности разреза «Барзаский» (множественные тектонические нарушения, примыкающие к продуктивным пластам водоносные горизонты, а также соседство угольных пластов и близких к ним по электрическим свойствам коренных пород) обуславливают необходимость использования трехмерного численного моделирования для верификации полученных данных.

Результаты исследований, полученные в 2013 (южный участок) и 2015 гг. (западный участок), сильно отличаются друг от друга по характеру данных: в 2013 г. изучаемый объект характеризовался наличием коренных пород, значения УЭС которых были близки к значениям УЭС каменного угля, в то время как в 2015 г. угольные пласты перекрывались лишь рыхлыми отложениями, а разница в значениях УЭС в этом случае составляла не менее одного порядка. Таким образом, верификация в первую очередь

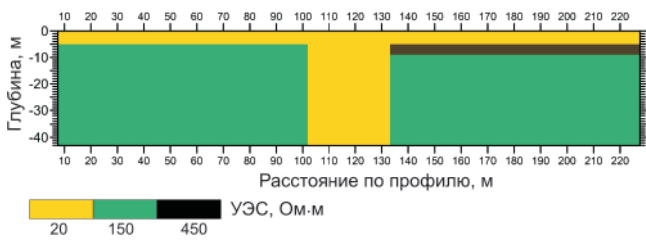


Рис. 17. Геоэлектрическая модель объекта исследования на южном участке разреза

жит пласт угля (УЭС 450 Ом·м). Расчет производился на нескольких моделях, отличавшихся друг от друга мощностью четвертичных отложений: от 5 до 20 м с шагом 5 м (рис. 18).

По результатам моделирования ситуации, когда пласт угля лежит поверх коренных пород, можно сделать предварительный вывод о том, что этот пласт оказывает сильное влияние на данные измерений. Как и ожидалось, максимальная чувствительность к пласту наблюдается при наимень-

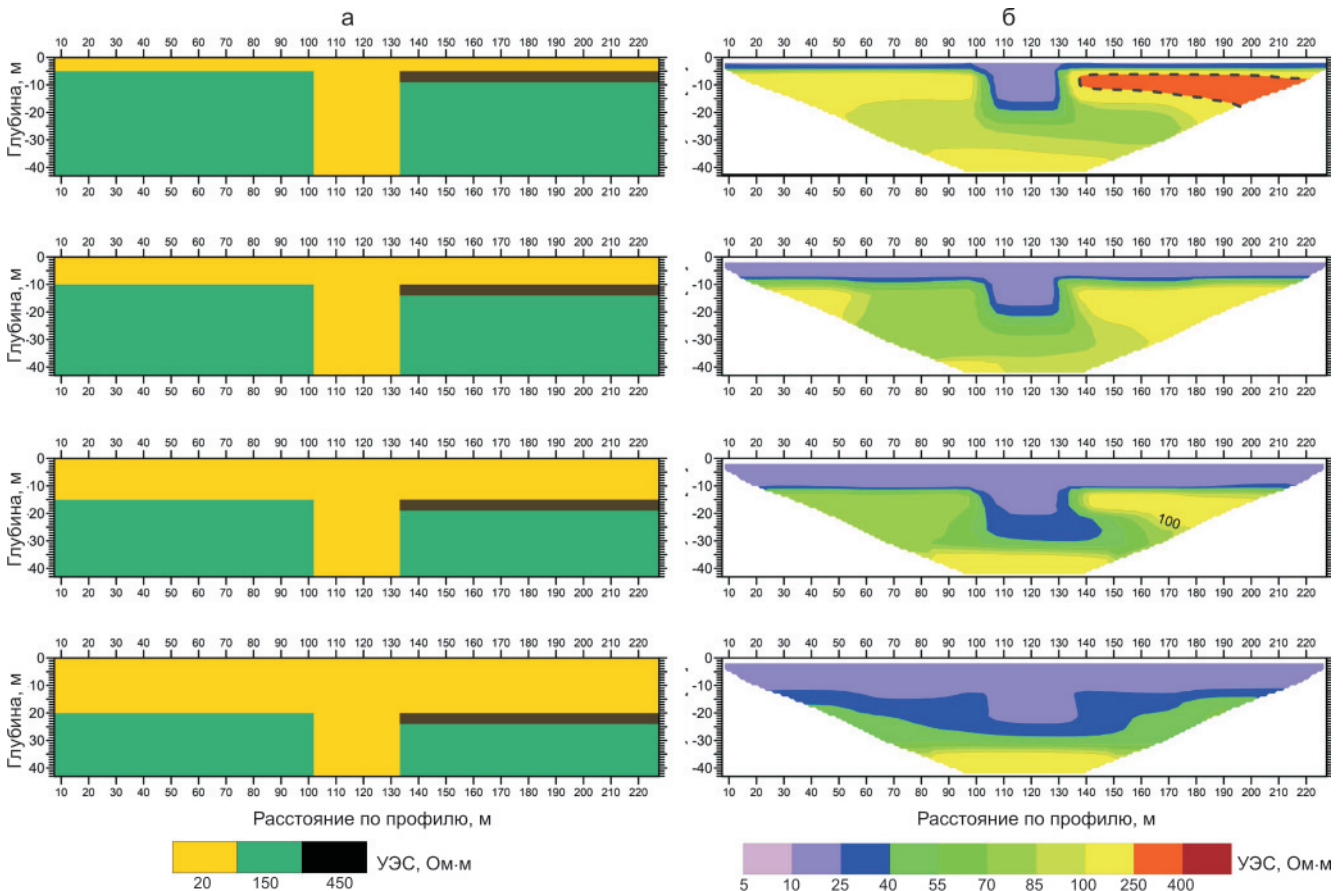


Рис. 18. Геоэлектрическая модель, на основе которой производился расчет влияния угольного пласта (а), и соответствующие результаты инверсии (б)

была необходима для данных, полученных в 2013 г. Основной вопрос, на который требовалось ответить: насколько хорошо выделяется пласт угля мощностью 4 м при наличии подложки из коренных пород, значение УЭС которых отличается от значений УЭС угля не более чем в 3 раза (по данным лабораторного анализа образцов).

Модель среды, по которой производились расчеты, была построена по результатам инверсии измерений 2013 г. (см. рис. 10, 11), а также по имеющимся данным геолого-разведочных работ (рис. 17).

На первом этапе исследования модель среды представляет собой блок коренных пород (УЭС 150 Ом·м) под слоем четвертичных отложений (УЭС 20 Ом·м), разорванный нарушением в инт. 102–134 м по профилю. Нарушение заполнено четвертичными отложениями. Поверх правого блока ле-

шей мощности четвертичных отложений. С ростом глубины залегания коренных пород угольный пласт на их фоне выделяется все хуже. Для определения степени влияния осадочного чехла на информативность измеряемых данных было произведено моделирование ситуации, в которой угольный пласт отсутствует (рис. 19).

Результаты моделирования демонстрируют в общем симметричную модель. Затем для оценки вклада угольного пласта в измеренные значения УЭС при увеличении мощности четвертичных отложений было выполнено вычитание результатов инверсии, полученных по данным одной модели (где угольный пласт отсутствует) из результатов инверсии, полученных по данным другой модели (угольный пласт присутствует). Полученные значения были пересчитаны в относительное отклонение в процентах (рис. 20).

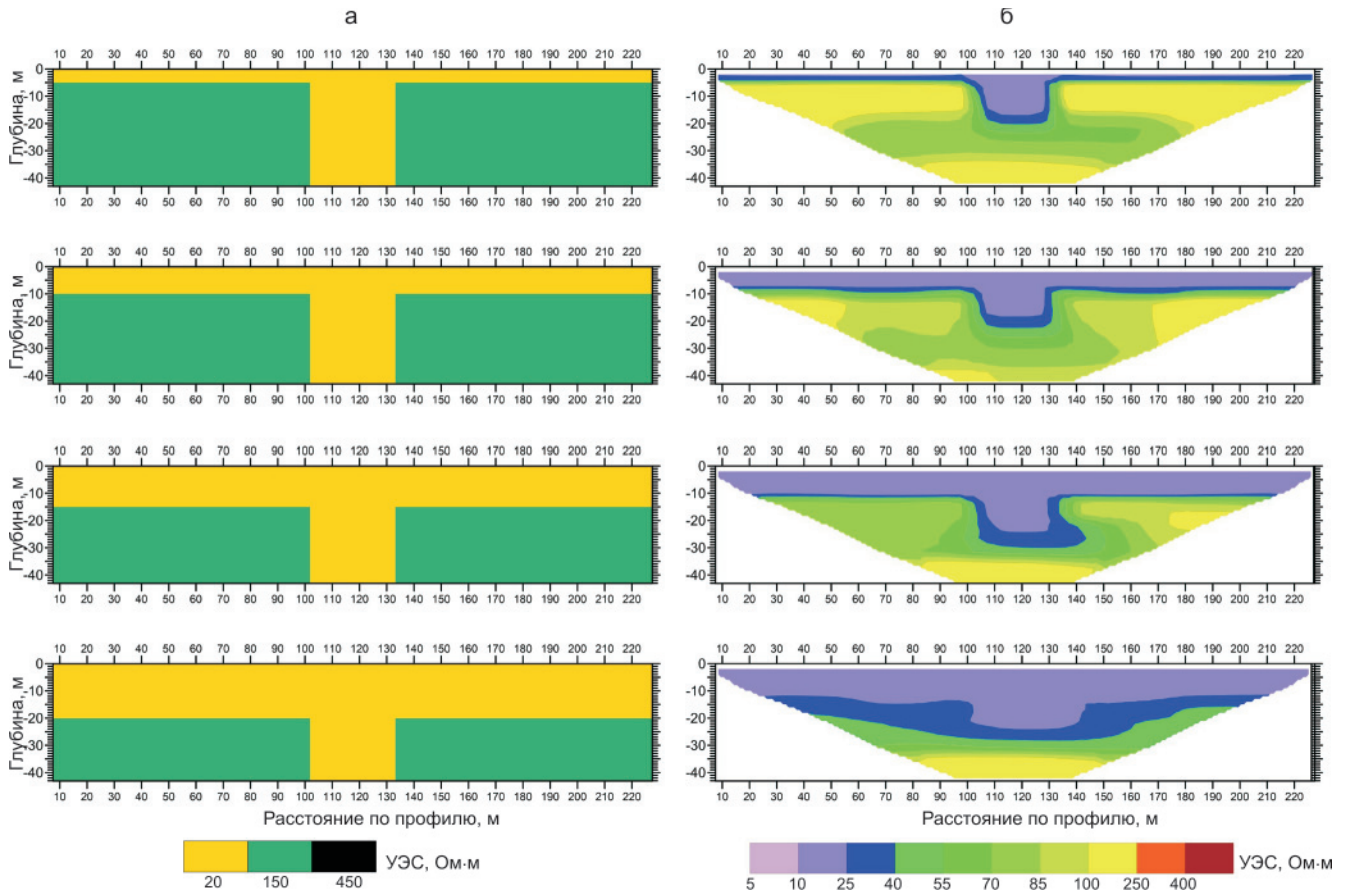


Рис. 19. Геоэлектрическая модель, на основе которой производился расчет без влияния угольного пласта (а), и соответствующие результаты инверсии модельных данных (б)

Вычитание результатов инверсии двух описанных моделей позволило определить вклад угольного пласта в восстановленную геоэлектрическую модель среды. При инверсии данных для моделей, где мощность четвертичных отложений над угольным пластом была равна 5 м, разница значений УЭС составила более 30 %. Таким образом, в этой ситуации имеется достаточная чувствительность к сравнительно маломощному (4 м) и слабоконтрастному (порядка 3 раз) объекту. В ситуации, приближенной к реальному геологическому разрезу (мощность четвертичных отложений примерно 10–15 м), разница инверсии модельных данных находится в пределах 20 %, что в абсолютных величинах для рассматриваемого диапазона УЭС составляет около 80 Ом·м. Такие величины уверенно попадают в измеряемый аппаратурой СКАЛА-48 диапазон значений.

Прямое численное моделирование геологического объекта, изученного в 2013 г., показало, что угольный пласт относительно малой мощности и контрастности вносит заметный вклад в регистрируемый измерительной аппаратурой сигнал. Однако однозначное выделение угольного пласта по данным лишь только одного геоэлектрического разреза является непростой задачей. Для успешного ее решения возможны два подхода.

1. Выполнение дополнительных измерений на участках, где отсутствуют угольные пласты и име-

ются лишь четвертичные отложения, покрывающие коренные породы, а затем сравнение данных полученных геоэлектрических разрезов и поиск признаков, указывающих на присутствие угольного пласта.

2. Построение и расчет двух групп численных трехмерных моделей геологической среды: среды, максимально приближенной к реальному объекту, и среды, отличающейся от реальной несколькими существенными параметрами (наличием/отсутствием угольного пласта, его мощностью, глубиной залегания и т. д.). Затем анализ полученных результатов и сравнение с данными полевого исследования.

Для более простых случаев также могут быть полезны построение и расчет численных трехмерных моделей: в случае с данными, полученными в 2015 г., моделирование было интересно с точки зрения определения конфигурации угольного пласта. На основе данных инверсии полевого материала, полученного по профилю 2 (см. рис. 16) была построена геоэлектрическая модель среды (рис. 21).

Результат инверсии данных прямого трехмерного численного моделирования для приведенной модели среды показан на рис. 22, на рис. 23 для сравнения – результаты инверсии полевых данных по профилю 2 в той же шкале значений УЭС.

Сравнение результатов инверсии полевого материала и модельных данных позволяет судить о том, что общая конфигурация пластов в модели была подобрана правильно (направление падения,

угол), но есть ряд особенностей, которые не были учтены. В частности, область высоких значений УЭС на рис. 23 значительно больше таковой на рис. 22. Кроме того, абсолютные значения УЭС в слабо

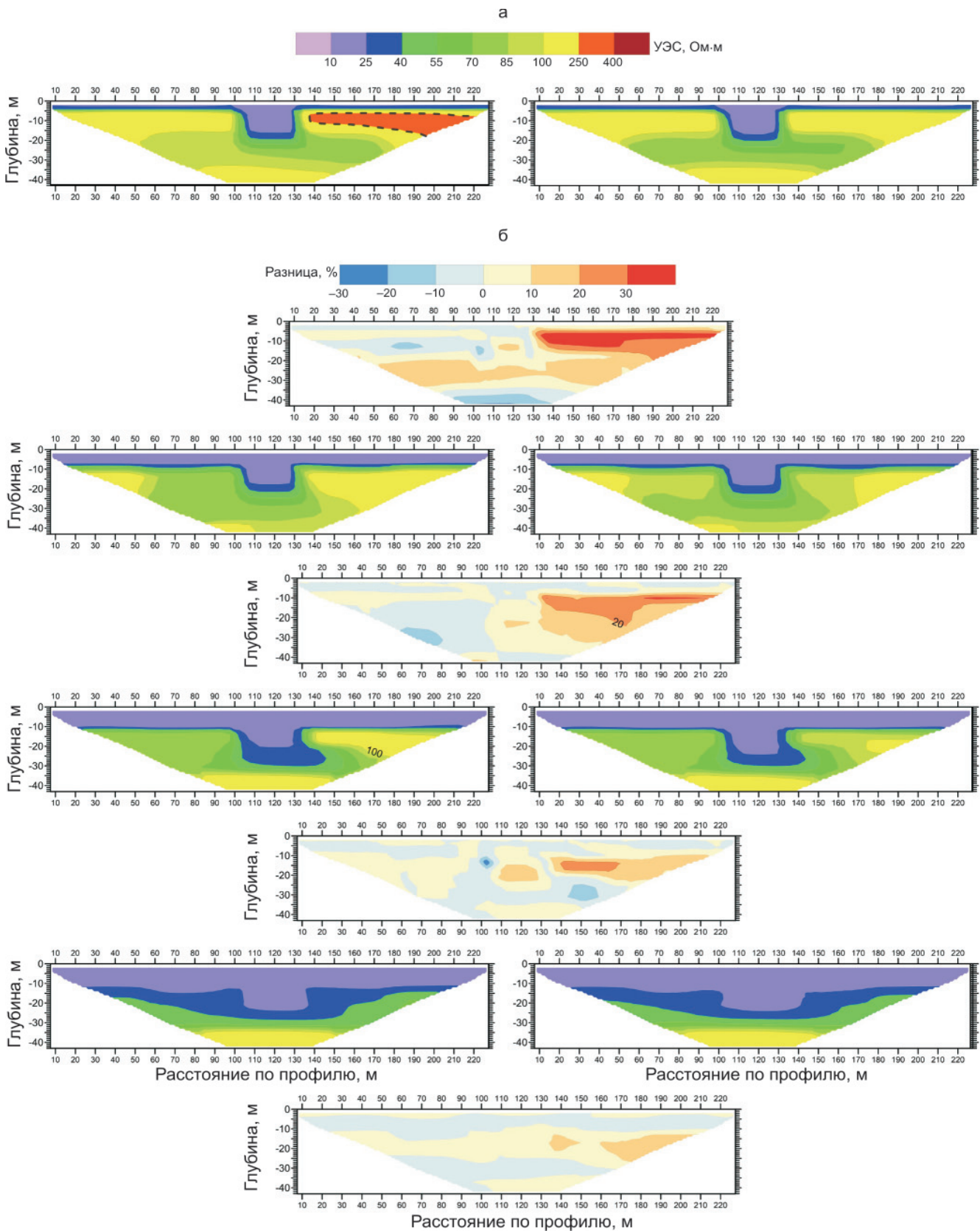


Рис. 20. Относительное отклонение между результатами инверсии данных прямого моделирования (в центре): а – результаты инверсии данных моделирования, б – разница между результатами инверсии при наличии (слева) или отсутствии (справа) угольного пласта

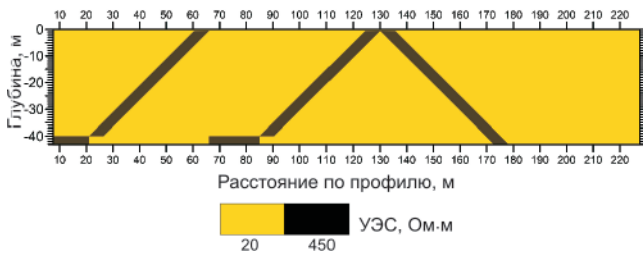


Рис. 21. Геоэлектрическая модель объекта исследования на западном участке разреза

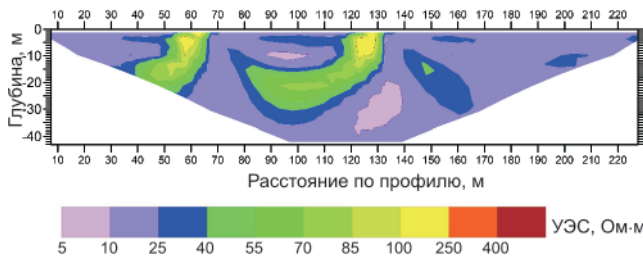


Рис. 22. Результаты инверсии модельных данных западного участка разреза

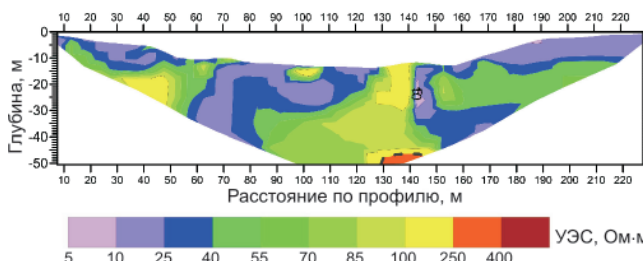


Рис. 23. Результаты инверсии полевых и модельных данных по профилю 2 на западном участке разреза, представленные в одной шкале

проводящей области значительно выше (инверсии материалов моделирования дают максимальные значения УЭС возле поверхности – около 200 Ом·м, в то же самое время инверсия полевых данных – около 400 Ом·м в нижней части геоэлектрического разреза).

Выводы

На основании проведенного исследования, включающего полевые работы методом электротомографии, интерпретацию результатов измерений и трехмерное математическое моделирование, можно сделать следующие основные выводы.

1. Электроразведочные работы на южном участке угольного разреза «Барзасский» позволили определить зоны тектонических нарушений, а также предварительно оценить глубину залегания угольного пласта. Вскрытие участка в 2013 г. подтвердило основные выводы, сделанные по результатам геофизических работ.

2. Работы на западном участке разреза «Барзасский» показали высокую информативность метода электротомографии при изучении угольных пластов, залегающих под четвертичными отложениями и не контактирующих с коренными породами. Интерпретация полевых данных позволяет не только

определить наличие/отсутствие угольных пластов, но также оценить угол их падения. При использовании трехмерного численного моделирования в сочетании с данными лабораторных исследований образцов породы также удается восстановить угольных мощности пластов.

3. Электротомография в целом показала высокую информативность при решении задачи доразведки угольного месторождения неглубокого залегания, что подтверждается данными вскрытия. Наибольшую трудность при интерпретации представляют геоэлектрические разрезы, в которых искомые объекты (угольные пласты) соседствуют с близкими по электрическим свойствам породами. Для решения этой проблемы предложен оперативный инструментальный – программа численного трехмерного моделирования на графическом процессоре, позволяющая верифицировать геоэлектрические разрезы в каждом конкретном случае и оценивать чувствительность и разрешающую способность.

4. Верификация полученных геоэлектрических разрезов даже на объектах, характеризующихся значительными тектоническими нарушениями, а также обилием хорошо проводящих водоносных горизонтов, обеспечивает результативность метода электротомографии при картировании угольных пластов и расширяет круг решаемых задач.

В дальнейшем планируется совершенствование методики трехмерного численного моделирования. В следующих версиях программы предполагается воспроизведение процесса накопления сигнала с варьированием тока в генераторных линиях, зашумление сигнала для имитации помех и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков А. Ю., Манштейн А. К. Геофизический прибор для автоматизации многоэлектродной электроразведки // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 4. – С. 123–125.
2. Неведрова Н. Н., Санчаа А. М., Суродина И. В. Трехмерное моделирование для угольных месторождений Кузбасса // ГЕО-Сибирь-2009. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: сб. матер. V Междунар. науч. конгр. – Новосибирск: СГУГиТ, 2009. – С. 82–86.
3. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1979. – 655 с
4. Суродина И. В., Лабутин И. Б. Разработка параллельных алгоритмов для решения задач каротажа на графических процессорах // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2012): тр. Междунар. науч. конф., Новосибирск, 26–30 марта 2012 г. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – С. 690–697.
5. Суродина И. В., Нестерова Г. В. Моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах // Петрофизика сложных коллекторов:



проблемы и перспективы – 2015. – М.: EAGE Геомодель, 2015. – С. 79–88.

6. **Case** studies of electrical and electromagnetic methods applied to mapping active faults beneath the thick quaternary / K. Suzuki, S. Toda, K. Kusunoki et al. // *Engineering Geology*. – 2000. – Vol. 56. – P. 29–45.

7. **Electrical** resistivity imaging technique to delineate coal seam barrier thickness and demarcate water filled voids / N. S. Krishnamurthy, V. Ananda Rao, D. Kumar et al. // *Journal Geological society of India*. – 2009. – Vol. 73, May. – P. 639–650.

8. **Golden** software. Surfer v.13. – Available at: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>.

9. **Johnson W. J.** Applications of the electrical resistivity method for detection of underground mine workings // *Geophysical technologies for detecting underground coal mine voids*. – Lexington, KY. – 2003. – No. 28–30, July. – Available at: <http://www.dappolonia.com/pdfs/techpaper12.pdf>.

10. **Labutun I.B., Surodina I.V.** Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // *Reliable Computing (Interval Computations) Journal*. – Available at: http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18.

11. **Loke M. H.** Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2D and 3D surveys by loke. Available at: <http://www.geoelectrical.com>.

12. **Wise D. J., Cassidyb J., Locke C. A.** Geophysical imaging of the Quaternary Wairoa North Fault, New Zealand: a case study // *Journal of Applied Geophysics*. – 2003. – Vol. 53. – P. 1–16.

REFERENCES

1. Bulgakov A.Yu., Manshteyn A.K. [A geophysical tool for the automation of multielectrode survey]. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Experimental Tools and Techniques*, 2006, no. 4, pp. 123–125. (In Russ.).

2. Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Surodina I.V. [3D modelling of coal deposits of Kuzbass]. *GEO-Sibir'-2009. T. 2. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Novye napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh: sb. materialov V Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* [GEO-Sibir-2009. Vol. 2. Subsoil use. Mining. New trends and technologies of prospecting, exploration, and development of mineral deposits: Proceedins of the 5th

International Scientific Congress]. Novosibirsk, 2009, pp. 82–86. (In Russ.).

3. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The Theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 65 p. (In Russ.).

4. Surodina I.V., Labutin I.B. [Development of parallel algorithms for well logging solutions using graphical processing units]. *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2012): Trudy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Parallel computational technology (PaVT'2012): Proceedings of the International Scientific Conference]. Tchelyabinsk, 2012, pp. 690–697.

5. Surodina I.V., Nesterova G.V. [Simulation of the data acquired by high-frequency logging and lateral logging using geophysical processors]. *Petrofizika slozhnykh kollektorov: problemy i perspektivy 2015. Sbornik statey EAGE* [Petrophysics of complex reservoirs: problems and prospects 2015. EAGE collected papers]. Moscow, 2015, pp. 79–88. (In Russ.).

6. Suzuki K., Toda S., Kusunoki K., et al. Case studies of electrical and electromagnetic methods applied to mapping active faults beneath the thick quaternary. *Engineering Geology*, 2000, vol. 56, pp. 29–45.

7. Krishnamurthy N.S., Ananda Rao V., Kumar D., et al. Electrical resistivity imaging technique to delineate coal seam barrier thickness and demarcate water filled voids. *Journal Geological society of India*. 2009, vol. 73, May, pp. 639–650.

8. Golden software. Surfer v.13. Available at: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>.

9. Johnson W.J. Applications of the electrical resistivity method for detection of underground mine workings. *Geophysical technologies for detecting underground coal mine voids*. Lexington, KY, 2003, No. 28–30, July. Available at: <http://www.dappolonia.com/pdfs/techpaper12.pdf>.

10. Labutun I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method. *Reliable Computing (Interval Computations) Journal*. Available at: http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18.

11. Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2D and 3D surveys by loke. Available at: <http://www.geoelectrical.com>.

12. Wise D.J., Cassidyb J., Locke C.A. Geophysical imaging of the Quaternary Wairoa North Fault, New Zealand: a case study. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, vol. 53, pp. 1–16.

© А. Н. Фаре, Н. М. Яркова, И. Н. Ельцов, 2017