

Рис. 4. Результаты комплексной интерпретации геофизических данных

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ № 122012000398-0.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований / ГИ УрО РАН. – М.: Науч. мир, 2007. – 247 с.
2. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.
3. Лучников М.С. Изучение электрических свойств надсолевых отложений на Восточно-Талицком участке ВКМКС // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 62-67. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.14.
4. Матвеев Б.К. Электроразведка. – М.: Недра, 1990. – 368 с.: ил.
5. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion 1 // Geophysical Prospecting. – 1996. – V. 44, № 3. – P.499-523.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2023.1.13

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА СКОПЛЕНИЯ СВОБОДНОГО МЕТАНА В ТРЕЩИННОМ КОЛЛЕКТОРЕ ПО ДАННЫМ ПЕТРОФИЗИКИ УГЛЕНОСНЫХ ФОРМАЦИЙ

Л.А. Иванов, В.В. Туманов

Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ) Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики (Донецк)

Аннотация: Использование прогрессивных геоэлектрических технологий для выявления скоплений свободного метана весьма актуально, так как с этими скоплениями связана аварийность и гибель людей на угольных шахтах. Незначительные размеры и слабая геоэлектрическая контрастность данных

скопления создают неблагоприятные условия для использования методов электромагнитного зондирования. Улучшить данные условия позволяют априорные геоэлектрические разрезы, характеризующиеся максимальной адекватностью реальному геологическому разрезу. Показан путь построения адекватных геоэлектрических разрезов, заключающийся в использовании петрофизического разреза, естественной стратификации геологического разреза на литолого-стратиграфические пачки, учета латерального изменения состава данных пачек, влияния трещинообразования и газонасыщенности на удельное электрическое сопротивление пород.

Ключевые слова: геоэлектрический разрез, петрофизика угольных формаций, скопления метана на угольных шахтах.

Введение

Скопление свободного метана на угольных шахтах представляет собой весьма опасное природное образование, поскольку неожиданное вскрытие его горными выработками приводит к авариям и гибели шахтеров. Поэтому обнаружение данных скоплений остается актуальным вопросом, перспективы решения которого связаны с использованием современных геофизических технологий.

К числу современных относятся методы активного и пассивного электромагнитного зондирования. Лучшим примером активного зондирования является метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), пассивного метода – аудиоманнитотеллурическое зондирование (АМТЗ). Применение данных методов предполагает использование в качестве основы интерпретации геоэлектрического разреза, представляющего собой вертикальную последовательность пачек (крупных слоев), характеризующихся мощностью и удельным электрическим сопротивлением (УЭС) [1, 2]. При этом весьма важным моментом исследования является решение вопроса адекватности априорного разреза его реальному эквиваленту.

Целью исследований является обоснование петрофизического подхода к построению априорного геоэлектрического разреза скопления свободного метана в трещинном коллекторе.

Методика исследований

Методика исследований заключается в решении следующих задач:

- определение наиболее точных значений УЭС пород по фондовым материалам;
- расчленение разреза на литолого-стратиграфические пачки;
- определение УЭС пачек до и после образования скопления метана.

УЭС пород достаточно просто определяется путем количественной интерпретации данных потенциал-зонда метода кажущихся сопротивлений или бокового каротажа по скважине, пройденной на исследуемом участке. При этом для пересчета кажущегося сопротивления в истинное значение необходимы дополнительные данные по УЭС бурового раствора и фактическому диаметру скважины. Однако фондовые материалы «Дела скважины» часто характеризуются потерей геофизических диаграмм, их плохой сохранностью, отсутствием данных по буровому раствору и диаметру скважины.

Поэтому для определения УЭС пород используется петрофизический подход, заключающийся в «посадке» петрофизического разреза на геологический разрез исследуемого участка. Петрофизические разрезы построены ранее для различных геологических объектов: в целом для Донбасса, угленосных районов, отдельных месторождений и глубоких скважин [3]. Посадка выполняется путем совмещения зон метаморфизма углей геологического и петрофизического разрезов. В результате получается петрофизический разрез исследуемого участка. Достоверность построения этого разреза контролируется по коэффициенту общей пористости пород и скорости распространения продольных упругих волн, полученной по данным акустического каротажа. Значения коэффициента пористости и скорости упругих волн петрофизического и геологического разрезов должны совпадать.

При выделении литолого-стратиграфических пачек используется свойство разреза образовывать ассоциации пород при заданной величине минимальной мощности пачки. В нашем случае она составляет 30 м. Пачкой определенного литологического типа считается последовательность слоев, удовлетворяющая двум требованиям: содержанию слоев данного типа более 50%; отсутствию перерыва мощностью более 30 м, состоящего из пород иного типа. К основным типам пород относятся песчаники, алевролиты и аргиллиты. Поэтому разрез расчленяется на песчаниковые, алевролитовые, аргиллитовые и смешанные пачки. Маломощные известняки и угли не образуют самостоятельных литолого-стратиграфических пачек мощностью более 30 м.

УЭС пачек рассчитывается как обратная величина средневзвешенной электропроводимости слоев пород по их мощности. В УЭС пачек, содержащих скопления свободного метана, вносится поправка за трещинообразование и газонасыщенность пород. Трещинообразование приводит к уменьшению УЭС водонасыщенных пород, газонасыщенность – к увеличению их УЭС. Большее воздействие оказывает газонасыщенность, поэтому совместное влияние трещиноватости и газонасыщенности заключается в увеличении УЭС. По данным ЗСБ величина УЭС трещиноватого углепородного массива на средних стадиях метаморфизма углей увеличивается примерно в 2 раза [4].

На завершающем этапе проверяется достоверность выделения пачек по УЭС. В качестве критерия используется отличие пачки от перекрывающей и подстилающей пачки на величину, не меньшую двукратной погрешности определения параметра геофизическим методом.

Построение геоэлектрического разреза выполнено на примере висячего крыла Григорьевского надвига вблизи границы шахт им. А.Ф. Засядько и «Щегловская-Глубокая» Донецкого каменноугольного бассейна. Следует отметить, что данный надвиг располагается в зоне динамического влияния Волновахско-Кадиевского глубинного разлома и характеризуется газопроявлениями в разведочных скважинах, положительными аномалиями газонасыщенности угольных пластов и плотности теплового потока, изотопным составом углерода метана углей и проявлениями ацетилена, указывающими на глубинный источник газа [5-7].

Результаты исследований

Построение геоэлектрического разреза скопления свободного метана является результатом использования и преобразования промежуточных конструкций: петроэлектрического разреза, геологического разреза и геоэлектрического разреза ненарушенных водонасыщенных пород.

Петроэлектрический разрез (ПЭР) является сокращенным вариантом петрофизического разреза [3]. Он отражает непрерывное изменение физических свойств однотипных пород по разрезу месторождения, обусловленное их катагенезом и литологической принадлежностью (рис. 1).

Данный разрез вскрывает зоны метаморфизма углей и катагенеза пород от 2Г до 6ОС. Наиболее распространенными типами пород разреза, как в и целом в Донбассе, являются песчаники, алевролиты и аргиллиты. Об их однотипности свидетельствует постоянная величина минералогической плотности на геоэлектрическом разрезе.

Синтетическим петрофизическим параметром, определяющим изменение других физических свойств однотипных пород, является коэффициент общей пористости (K_n). Сверху вниз по ПЭР от стадии 2Г до 6ОС параметр K_n заметно уменьшается от 5,2-9,4% до 3,0-3,3%. Данное уменьшение пористости приводит к существенному уве-

личению параметра $\rho_{п}$ от 30-60 Ом·м до 60-180 Ом·м. При этом большими значениями параметров $K_{п}$ и $\rho_{п}$ характеризуются песчаники, меньшими значениями – аргиллиты.

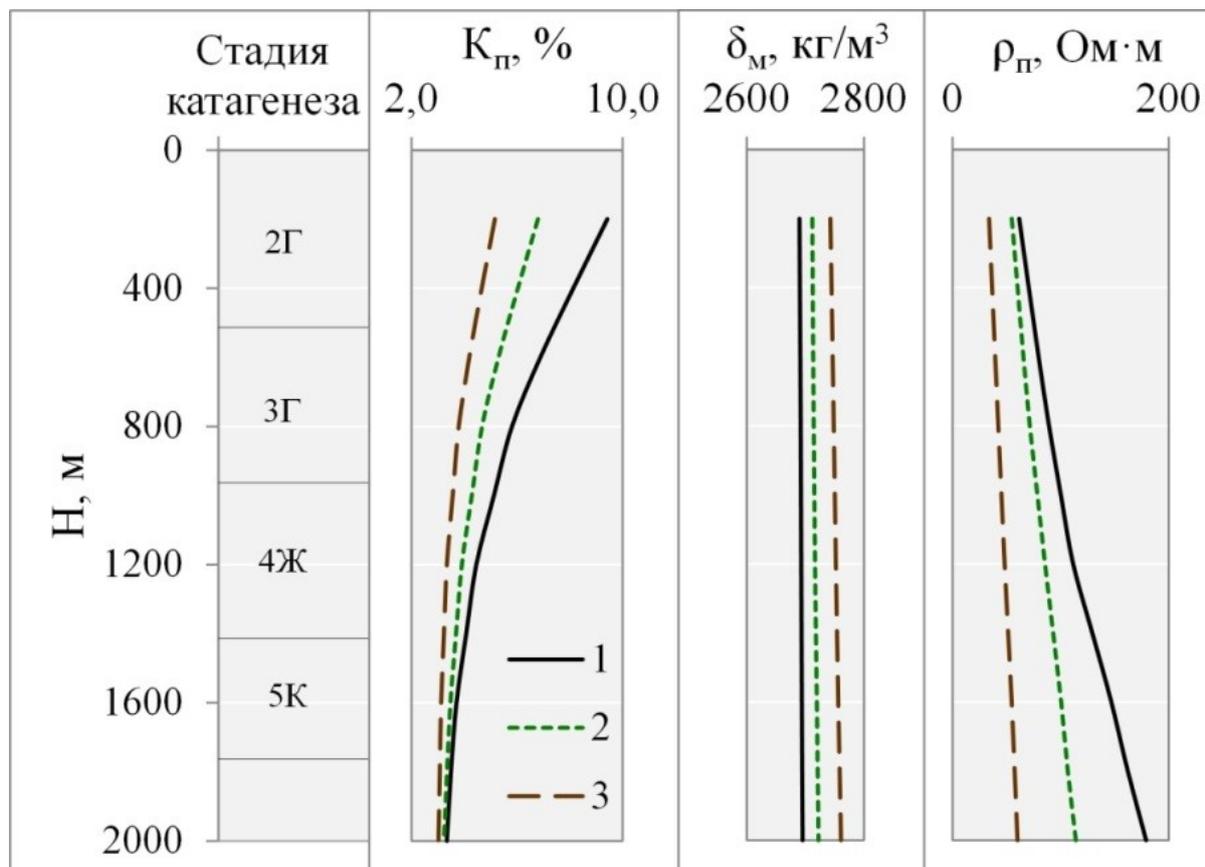


Рис. 1. Петроэлектрический разрез: $K_{п}$ – коэффициент общей пористости; $\delta_{м}$ – минералогическая плотность пород; $\rho_{п}$ – удельное электрическое сопротивление пород; 1 – песчаник мелкозернистый с глинистым цементом; 2 – алевролит с глинистым цементом; 3 – аргиллит

Существенной особенностью данного ПЭР является то, что на глубине около 1000 м параметр $K_{п}$ песчаников уменьшается и становится равным 5%. В результате начиная с указанной глубины и ниже по разрезу исчезают коллекторы гранулярного типа. Однако за счет увеличения хрупкости пород, обусловленной катагенезом, и проявления тектонического трещинообразования вблизи разломов создаются благоприятные условия для возникновения коллекторов трещинного типа, отличающихся высокой проницаемостью.

Геоэлектрический разрез (ГЭР) ненарушенных водонасыщенных пород, в отличие от ПЭР, отражает дискретное изменение физических свойств пачек, т.е. так, как их «видят» методы геофизических зондирований. Для литолого-стратиграфического расчленения разреза на пачки мощностью более 30 м использовался геологический разрез рядом расположенной углеразведочной скважины (рис. 2).

ГЭР отражает изменение содержания песчаников, алевролитов и аргиллитов, а также коэффициента общей пористости песчаников ($K_{п}$) и УЭС 19 пачек. Разрез характеризуется крайне неравномерным распространением песчаниковых пачек и относительно равномерным распределением аргиллитовых пачек. Песчаниковые пачки залегают на глубине 100, 200 и 1000 м. Данные пачки образуют положительные аномалии по УЭС. Особенно резко выделяется пачка на глубине 1000 м. Ее УЭС (100 Ом·м) в два раза превышает УЭС перекрывающей и подстилающей пачки.

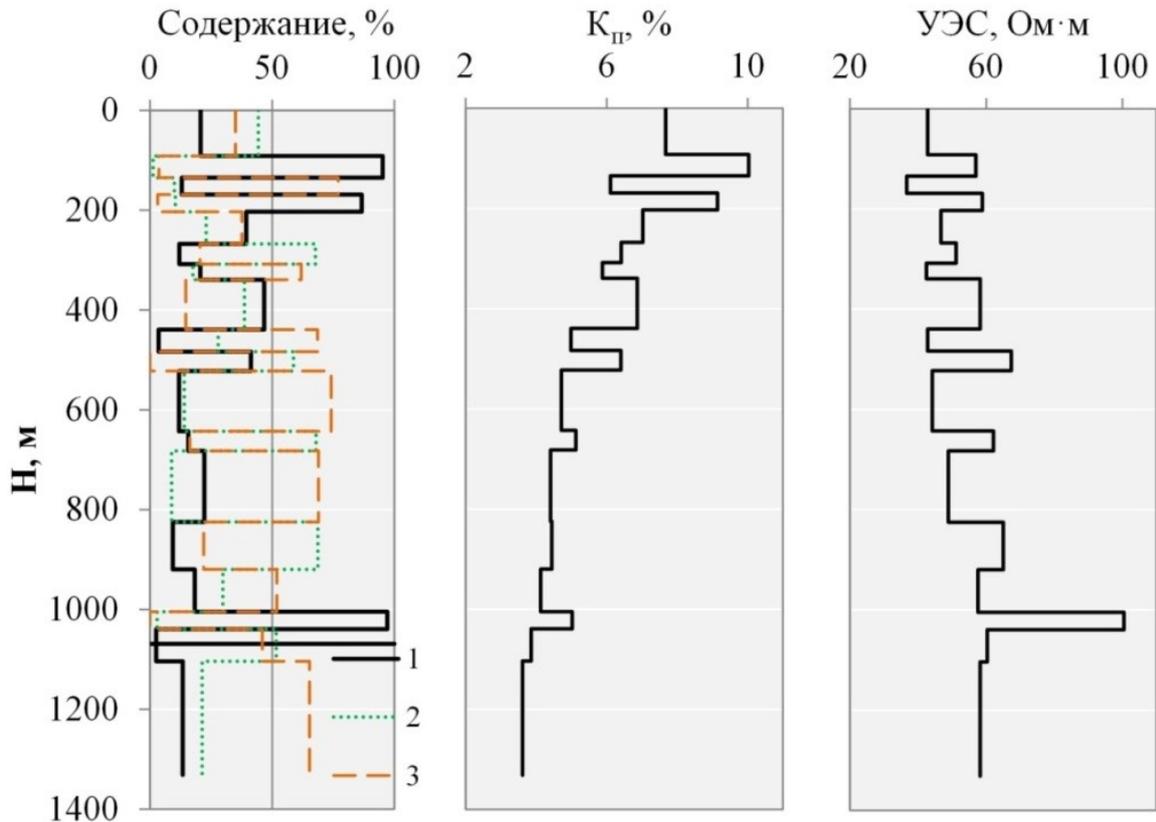


Рис. 2. Геоэлектрический разрез ненарушенных водонасыщенных пород: 1 – содержание песчаников; 2 – содержание алевролитов; 3 – содержание аргиллитов; K_p – коэффициент общей пористости песчаников; УЭС – удельное электрическое сопротивление пачки; H – глубина

Геоэлектрический разрез со скоплением свободного метана (ГЭРС) представляет собой фрагмент предыдущего геоэлектрического разреза, состоящий из четырех пачек, из которых две средние пачки подвержены трещинообразованию и смене водного флюида газовым, что соответствует условию скопления метана в трещинном коллекторе (Рис. 3).

На ГЭРС приведены те же показатели литологического состава пачек и параметр УЭС, что на ГЭР, а также дополнительно введен коэффициент $K_{УЭС}$.

Коэффициент $K_{УЭС}$ представляют собой отношение УЭС трещиноватых газонасыщенных пород к нетрещиноватым водонасыщенным породам:

$$K_{УЭС} = \frac{УЭС_{тгп}}{УЭС_{вп}}, \quad (1)$$

где $УЭС_{тгп}$ – удельное электрическое сопротивление пачки трещиноватых газонасыщенных пород; $УЭС_{вп}$ – удельное электрическое сопротивление пачки нетрещиноватых водонасыщенных пород.

Особенность данного коэффициента заключается в его конструкции. В данном коэффициенте, чтобы отразить влияния трещиноватости и газонасыщенности на УЭС пачки, за основу берется УЭС этой же пачки, но при условии, что она водонасыщенная. Аналогичный прием используется в нефтегазовой петрофизике при расчете параметра насыщения коллектора газом (нефтью) по данным электрических методов геофизических исследований скважин [8]. При этом УЭС водонасыщенных пород определяется по другой скважине, расположенной за контуром газонасыщенности, либо находится рас-

четным путем. В нашем случае УЭС водонасыщенных пород определяется по петрофизическим зависимостям, учитывающим тип породы, степень катагенеза, температуру и минерализацию пластовых вод [4].

Охарактеризуем пачки сверху вниз по ГЭРс.

1. Аргиллитовая пачка. По литологическому составу она неоднородная. Содержит 18% песчаников, 30% алевролитов и 52% аргиллитов. Пачка нетрещиноватая и водонасыщенная. Параметр УЭС составляет 58 Ом·м. Коэффициент $K_{УЭС}$ равен 1,0 отн. ед. и свидетельствует о водонасыщенном состоянии пород. Залегает в интервале глубин от 920 до 1005 м. Мощность пачки равна 85 м.

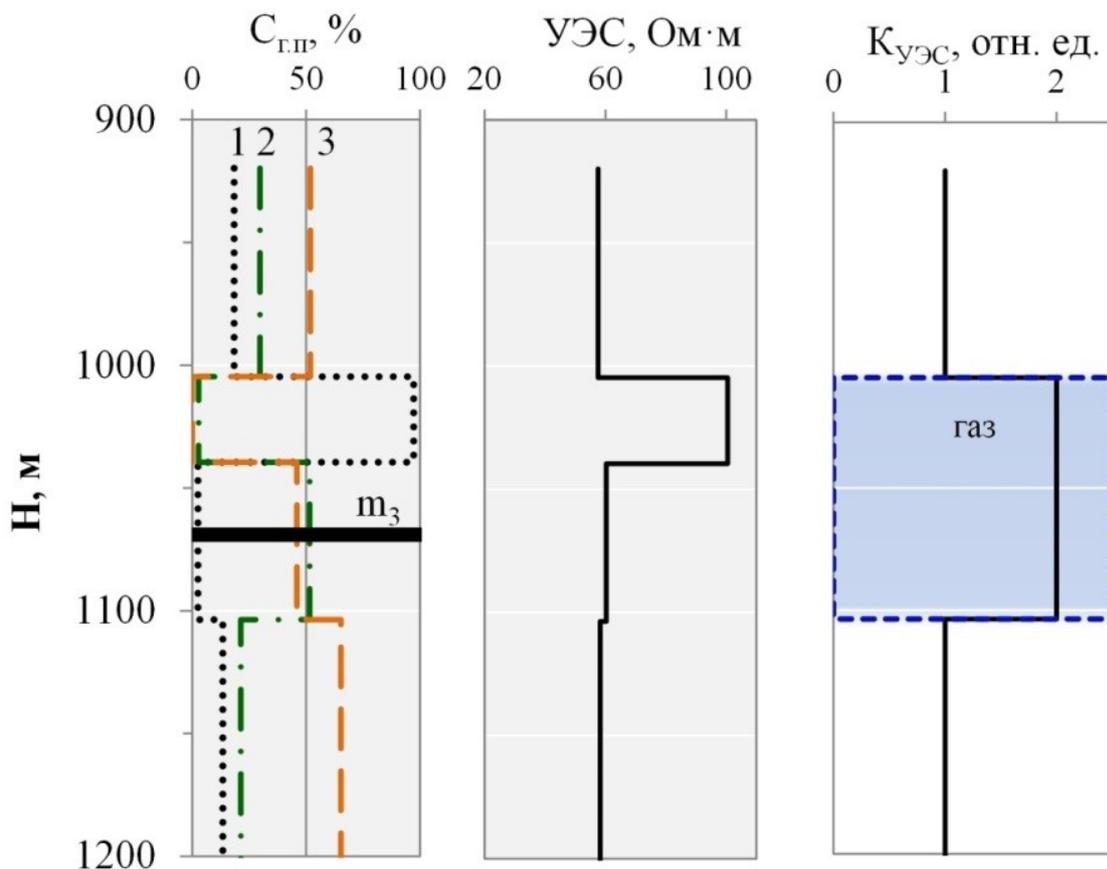


Рис. 3. Геоэлектрический разрез скопления свободного метана в трещинном коллекторе: УЭС – удельное электрическое сопротивление пачки; $K_{УЭС}$ – коэффициент изменения УЭС; $C_{гл.}$ – содержание горных пород в пачке; 1 – песчаники; 2 – алевролиты; 3 – аргиллиты; m_3 – синонимика целевого угольного пласта; H – глубина; «газ» – газонасыщенное состояние пачки

2. Песчаниковая пачка. В ней содержание песчаников весьма высокое и составляет 97%, алевролитов – всего лишь 3%. Пачка трещиноватая и газонасыщенная. В водонасыщенном состоянии параметр УЭС равен 100 Ом·м. Газонасыщение увеличивает параметр УЭС и поэтому коэффициент $K_{УЭС}$ составляет около 2 отн. ед. Пачка залегаєт в интервале глубин от 1005 до 1040 м. Ее мощность равна 35 м.

3. Алевролитовая пачка. По литологическому составу она приближается к аргиллитовой пачке, поскольку содержание алевролитов и аргиллитов соответственно равно 52 и 46%, песчаников – всего 2%. Пачка трещиноватая и газонасыщенная. В водонасыщенном состоянии ее параметр УЭС составляет 60 Ом·м. В результате газонасыщения параметры УЭС увеличивается и коэффициент увеличения $K_{УЭС}$ составляет около 2 отн. ед. Пачка содержит целевой угольный пласт m_3 . Она залегаєт в интервале глубин от 1040 до 1105 м. Мощность пачки составляет 65 м.

4. Аргиллитовая пачка. Содержит 13% песчаников, 21% алевролитов и 66% аргиллитов. Пачка нетрещиноватая и водонасыщенная. Параметр УЭС составляет 58 Ом·м, коэффициент $K_{УЭС}$ равен около 1 отн. ед. Пачка залегает в интервале глубин от 1105 до 1330 м. Ее мощность равна 225 м.

Анализ ГЭРс показывает, что песчаниковые и алевролитовые пачки, представляющие собой трещиноватый коллектор свободного метана, уверенно выделяются по увеличению УЭС относительно пачек водонасыщенных нетрещиноватых пород эквивалентного состава и степени катагенеза. При этом увеличение УЭС оценивается величиной в 2 раза.

Обсуждение результатов исследований

Построение геоэлектрического разреза скопления свободного метана в трещинном коллекторе угленосных отложений выполнено как трансформация петрофизического разреза. Петрофизический путь выбран потому, что практически невозможно из фондовых материалов извлечь необходимую информацию об истинном значении удельного электрического сопротивления пород, а также потому, что не всегда геологоразведочные скважины размещаются на исследуемом участке.

Отказ от удельного электрического сопротивления, измеренного в скважине, расположенной на участке исследования, вовсе не означает потерю достоверности данных. Напротив, обоснованное распространение данных петрофизического разреза на исследуемый разрез гарантирует достоверность значений УЭС конкретных типов пород.

Трансформация петрофизического разреза имеет еще одно преимущество. Петрофизический разрез описывает непрерывное изменение геофизического параметра по всему интервалу глубин исследования. Непрерывность петрофизического разреза позволяет определить значения физических свойств пачки, расположенной в любой части геологического разреза.

Литологическое расчленение разреза используется по ближайшей скважине при условии выдержанности строения разреза в соседних скважинах. При отсутствии указанной выдержанности вносятся коррективы в строение разреза, учитывающие латеральное изменение литологического состава пород. По проверенному геологическому разрезу производится его литолого-стратиграфическое расчленение на пачки.

Рассматриваемый способ построения геоэлектрического разреза позволяет достичь максимальной адекватности реальному разрезу в пункте зондирования двум основным атрибутам: мощности пачек и их УЭС. За счет контроля латерального изменения литологического состава пачек обеспечивается реалистичность состава и мощности пачек. Использование петрофизических закономерностей также позволяет не допустить к рассмотрению случайных данных и получить наиболее реалистичные значения УЭС.

Конструкция коэффициента изменения УЭС пачек копирует параметр насыщения пород газом (нефтью), широко используемый при геофизических исследованиях скважин газовых и нефтяных месторождениях. По величине данного коэффициента, равной около 2 отн. ед., на месторождениях угля средних стадий метаморфизма выделяются природные скопления свободного метана в трещинных коллекторах. Данный коэффициент позволяет выделять не только природные, но и техногенные коллекторы метана в подработанном углепородном массиве. Для использования рассматриваемого коэффициента на других стадиях метаморфизма углей необходимо проведение исследований по определению величины данного коэффициента.

Выводы

Выполненные исследования позволили получить следующие результаты:

1. Показан путь построения геоэлектрического разреза скопления свободного метана в терригенном коллекторе, который сводится к решению следующих ключевых задач: привязке известного петрофизического разреза к исследуемому геологическому разрезу для определения его петрофизических параметров; объединению слоев геологического разреза в литолого-стратиграфические пачки, мощность которых (не менее 30 м) позволяет их выделять методами электромагнитного зондирования; определению УЭС данных пачек по УЭС и мощности слагающих их слоев; пересчету УЭС пачек на трещиноватое газонасыщенное состояние пород.

2. Для оценки увеличения УЭС пачки за счет газонасыщения предложено использовать коэффициент $K_{УЭС}$, равняющийся отношению УЭС газонасыщенной пачки к ее УЭС в водонасыщенном состоянии. При этом УЭС газонасыщенной пачки измеряется геофизическим методом, а ее УЭС в водонасыщенном состоянии определяется по петрофизическим зависимостям УЭС пород от их литологической принадлежности, степени катагенеза, температуры и минерализации пластовых вод, свойственных данной пачке.

3. Установлено, что на средних стадиях метаморфизма углей коэффициент $K_{УЭС}$ литолого-стратиграфических пачек в газонасыщенном состоянии почти в 2 раза больше водонасыщенных пачек, что служит основанием для выделения скоплений свободного метана в трещинных коллекторах угленосных формаций по данным электромагнитного зондирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Кожевников Н.О. Выделение пластов-коллекторов в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным зондирований становлением поля в ближней зоне // Геофизика. – 2010. – № 6. – С. 47-52.
2. Сараев А.К., Антащук К.М., Симаков А.Е., Шлыков А.А. Перспективы применения электромагнитных зондирований с мощным контролируемым источником при поисках углеводородов в арктическом регионе России // Недропользование XXI век. – 2016. – № 3 (60). – С. 92-103.
3. Гречухин В.В. Петрофизика угленосных формаций / НПО «Нефтегеофизика». – М.: Недра, 1990. – 472 с.: ил.
4. Анциферов А.В., Иванов Л.А., Туманов В.В., Савченко А.В., Анциферов В.А. Использование электромагнитного зондирования для оценки состояния подработанного углепородного массива // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 15-19. – DOI: 10.15372/FPVGN2021080102.
5. Корчемагин В.А., Павлов И.О, Никитенко А.В. Структурно-тектоническая позиция скоплений метана в угленосных отложениях Донецко-Макеевского района // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Гірничо-геологічна. – 2011. – Вип. 13 (178). – С. 25-30. – Текст электронный. – URL: <http://masters.donntu.ru/2014/igg/antropova/library/article4.pdf>.
6. Анциферов А.В., Канин В.А., Голубев А.А., Галемский П.В. Данные о глубинных подтоках флюидов, формирующих современную газонасыщенность пород Донбасса // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – 2014. – № 14. – С. 384-398.
7. Тараник А.А., Тихолиз А.М. Исследование химического состава рудничных газов с целью определения их генезиса в угольном пласте I₁ шахты им. А.Ф. Засядько // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XVII Междунар. науч. шк. им. акад. С.А. Христиановича / Таврич. нац. ун-т [и др.]. – Симферополь, 2007. – С. 288-290.
8. Итенберг С.С. Промысловая геофизика. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 388 с.