УДК 551.24:550.8.012

ПРЕДПОСЫЛКИ ТРЕХМЕРНОГО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАНА

Тиркель М.Г., Иванов Л.А., Компанец А.И., Анциферов В.А.
(*УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина*)

Видобуток метану з углепородного масиву збільшується за рахунок чинника розстановки свердловин дегазувань на ділянках зосередження порід-колекторів кращої якості. Такі ділянки, що часто пропускаються бурінням, виявляються шляхом петрофізичного і формаційного аналізу даних сейсморозвідки високої роздільної здатності, зондувань становленням електромагнітного поля і геофізичних досліджень свердловин.

Methane recovery of coal-rock mass is increased at the expense of arrangement of wells at the areas of concentration of the high-grade reservoir rocks. Such areas often omitted by drilling are revealed by petrophysical and formational data analysis of high-resolution petrophysical, transient electromagnetic sounding and logging.

Постановка проблемы. Увеличить эффективность извлечения метана из углепородного массива возможно за счет фактора расстановки добычных (дегазационных) скважин на участках распространения пород-коллекторов лучшего качества, дополнительно перекрытых непроницаемыми покрышками. Такими участками являются места локального увеличения мощности и зернистости песчаных пластов на месторождениях угля, не превышающих стадию Г метаморфизма. К ним также относятся зоны трещиноватых пород, сопутствующие

малоамплитудным тектоническим нарушениям на месторождениях не выше стадии A_1 метаморфизма углей [1].

Обнаружение мест локального улучшения качества коллекторов представляет собой определенную проблему. Выявить их возможно двумя основными методами: разведочным бурением и разведочной геофизикой.

Разведочное бурение имеет неоспоримое преимущество, состоящее в непосредственном изучении вещества и свойств горных пород. Однако, из-за дороговизны скважин применение данного метода не является целесообразным. Значительно меньшими затратами характеризуются методы разведочной геофизики, но их геологическая эффективность в решении данного вопроса остается неизвестной. Таким образом, проблема сводится к отсутствию экономически эффективного и одновременно геологически достоверного метода обнаружения мест локального улучшения качества коллекторов.

Наиболее перспективным направлением в решении данной проблемы является разработка комплексной геолого-геофизической методики, объединяющей преимущества разведочного бурения и разведочной геофизики.

Разработка такой методики возможна лишь при положительном ответе на вопрос о наличии определенных физико-геологических предпосылок решения рассматриваемой задачи. Кроме того, возникает сопутствующий вопрос о необходимости трехмерного изучения углепородного массива для исключения пропусков локальных экстремумов качества пород-коллекторов. Поэтому целью данного исследования является установить необходимость и определить предпосылки трехмерного геолого-геофизического изучения углепородного массива для обнаружения мест локального повышения качества коллектора, благоприятных для заложения дегазационных скважин.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. Вопрос изучения углепородного массива комплексом геологических и геофизических методов для извлечения метана является малоизученным, поскольку попытки его решения чаще всего сводятся к самостоятельному использованию этих методов.

Разведочное бурение на уголь не предусматривает изучения состава и морфологии пород-коллекторов [2], поэтому оно изначально дает лишь общее представление о гранулярных коллекторах. Остаются необнаруженными и трещинные породы-коллекторы, связанные с малоамплитудными нарушениями, поскольку последние пропускаются разведочным бурением [1]. В данных случаях выявлению локальной неоднородности препятствует редкая сеть скважин.

К подобному выводу приходят и другие исследователи, указывая, что в ряде случаев разведочным бурением оказываются просто пропущенными резервуары накопления газов традиционного и нетрадиционного типов, отличающиеся малыми размерами в плане [3].

Метод отраженных волн (МОГТ) успешно используется на угольных месторождениях для выделения малоамплитудных тектонических нарушений [1]. С этими нарушениями генетически связаны зоны повышенной трещиноватости, представляющие собой трещинные коллекторы. Поэтому данный тип коллекторов может быть выделен методом МОГТ. Этим методом также выделяются гранулярные коллектора в случае заполнения их газом.

Использование современных методов электроразведки в Донбассе находится на стадии становления. Метод вертикального электрорезонансного зондирования (ВЭРЗ) позволяет в разрезе определить интервалы залегания и мощность аномально поляризованных пластов типа “газонасыщенный пласт”, ”угольный пласт” и “нефтегазовый пласт”. На приводимых геоэлектрических разрезах месторождений угля [4] и углеводородов [5] выделенные пласты характеризуется постоянным значением электрического параметра, из чего следует, что рассматриваемый метод позволяет выполнять лишь качественную интерпретацию кривых зондирования. Подтверждаемость данных ВЕРЗ результатами геофизических исследований скважин (ГИС) по продуктивным горизонтам месторождений углеводородов составляет до 60 % [6].

Имеются также указания о перспективности метода зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и метода частотного зондирования (ЧЗ) [3].

Таким образом, на угольных месторождениях методами разведочной геофизики выделяются коллекторы различных типов, однако вопрос изучения их латеральной изменчивости является пока нерешенным и требует теоретической проработки.

Полученные результаты и их обоснование. *Необходимость трехмерного изучения углепородного массива* вытекает из особенностей расположения скважин и латеральной изменчивости песчаных коллекторов. Реальное представление о разведочной сети дает план расположения скважин, вскрывших добываемый угольный пласт (рисунок 1). Из плана следует, что скважины располагаются неравномерно, в виде линий вытянутых в одном направлении.

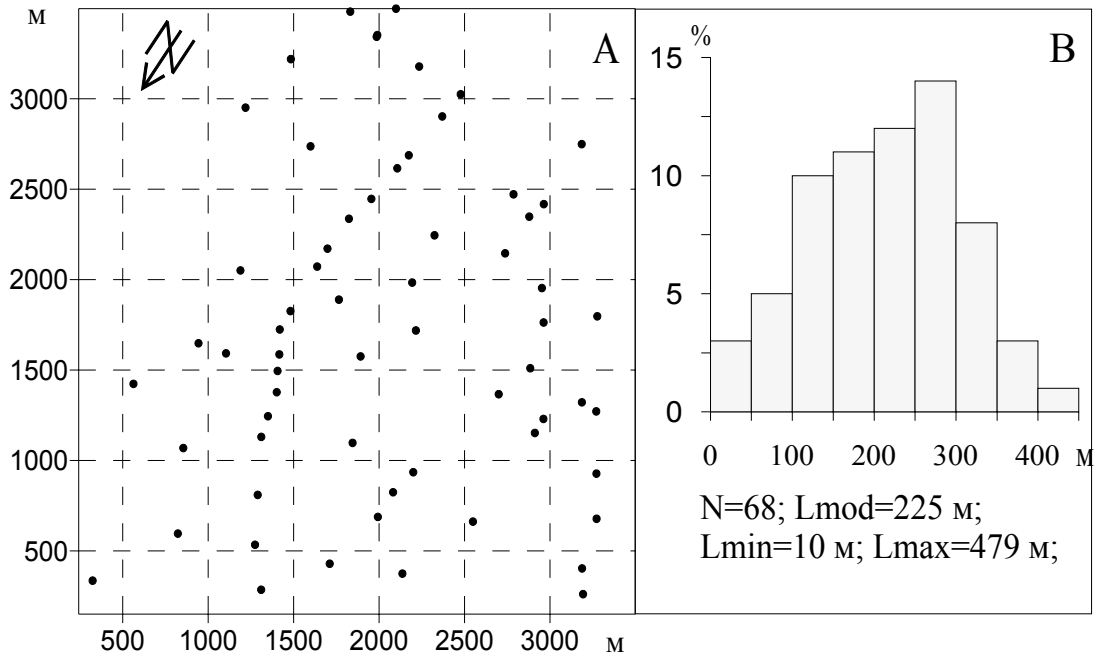

Рис. 1. Расстановка скважин (А) и расстояние между ближайшими скважинами (В). Донецкий бассейн, Красноармейский угленосный район, фрагмент поля шахты “Краснолиманская”: N – количество скважин; L_{min}, L_{max}, L_{mod} – расстояние между ближайшими скважинами, соответственно, минимальное, максимальное и среднее

Около 90% скважин расположены на расстоянии 100-350 м. При этом большая часть скважин, находящихся на расстоянии 100-250 м, плотно расположились на одной линии и на общую картину латерального изменения коллекторов они практически не влияют. Типичным межскважинным расстояниям является величина 300±50 м.

Особенностью изменения песчаников в плане является образование локальных экстремумов мощности, величина которых относительно среднего значения составляет ±40-60%. Экстремумы непредсказуемы и, как следует из рисунка 2, могут появляться между скважинами, расположенными на расстоянии 200 м. Данная величина не превосходит типичное межскважинное расстояние. Поэтому экстремумы мощности песчаников пропускаются при проведении разведочного бурения.

Таким образом, сеть разведочного бурения не способна выявить локальные экстремумы мощности песчаников и зоны трещиноватости, имеющие практическое значение при расстановке дегазационных скважин. Поэтому существует необходимость в непрерывном прослеживании латеральной изменчивости пород-коллекторов. Вместе с проводимым непрерывным вертикальным исследованием горного массива (по скважинам) непрерывное изучение латеральной изменчивости образует объемное исследование углепородного массива.

Комплексирование методов исследования. Исследование углепородного массива проводится на разбуренных шахтных полях. В комплекс включены рекомендуемые к проведению методы и методы, по которым работы выполнены ранее. К первым относятся методы разведочной геофизики, ко вторым - геологическое и геофизическое исследование разрезов скважин.

Из методов разведочной геофизики представляется целесообразным включить в комплекс МОГТ и ЗСБ. МОГТ необходимо использовать для выявления трещинных коллекторов, связанных с малоамплитудной тектоникой, а также для построения структурного каркаса горного массива. Следует отметить, что в данном случае рассматриваются лишь 2-D сейсморазведка, учитывая, что 3-D сейсморазведка на угольных месторождениях пока не нашла своего применения.

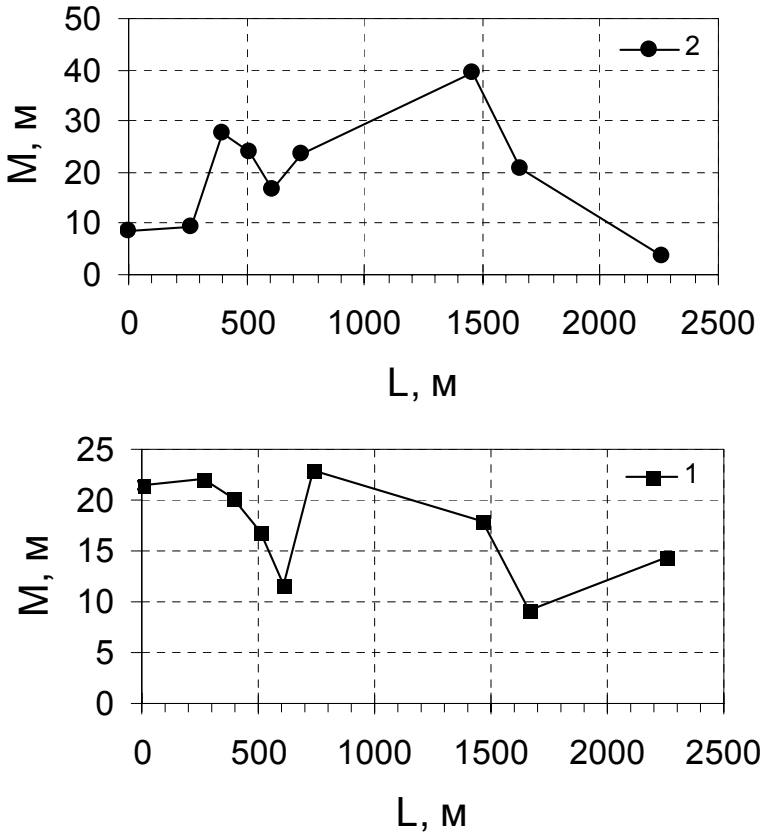

Рис. 2. Изменение мощности песчаников (M) по профилю скважин длиной (L). Донецкий бассейн, Красноармейский угленосный район, поле шахты “Краснолиманская”: 1 – песчаник m_4^0 S m_4^2; 2 – песчаник m_1^1 S $m_3^в$

Важными достоинствами ЗСБ являются его высокая детальность расчленения геологического разреза и возможность объемного изучения горного массива при сравнительно малых затратах. Развитие метода получило толчок в связи с созданием аппаратуры нового поколения серии “Импульс”. Перспективы применения данной аппаратуры в угольных бассейнах до конца не раскрыты. Однако результаты работ, полученные при решении сходных задач в других геологических условиях, свидетельствуют о ее больших возможностях.

Так при решении инженерно-геологических задач ЗСБ включается в комплекс вместе с электрическим вертикальным зондированием (ВЭЗ), МОГТ и методом МПВ. При этом методом ЗСБ изучается изменение по разрезу удельного электрического

сопротивления и прогнозируется литологический состав пород [7]. Данный метод также применяется для изучения особенностей сложно построенной верхней части геологического разреза. Он позволяет расчленить разрез с высокой детальностью, проследить его непрерывно и не пропустить локальные неоднородности геологического строения. Глубина исследования в приводимых примерах изменяется от 50 до 400 м. При необходимости глубинность метода увеличивается путем увеличения размеров генераторной системы [8,9].

Таким образом, применение ЗСБ позволяет раскрыть картину объемного изменения УЭС горного массива. Возможности истолковать данную картину в понятиях качества коллекторов определяются природными закономерностями изменения физических свойств угленосных отложений.

Физические свойства угленосных пород. Петрофизические закономерности изменения однотипных пород изучены по площади и разрезу Донбасса. В результате выполненных исследований установлена эпигенетическая природа данных закономерностей и на их основе определены условия, при которых петрофизические зависимости, обусловленные составом пород, являются однозначными [10]. Данные зависимости комплексно и с большой детальностью изучены на месторождениях газовых, коксующихся и антрацитовых углей [11, 12, 13]. Результаты этих исследований позволяют оценить предпосылки решения рассматриваемой задачи.

По данным петрофизики, все многообразие минерального состава угленосных пород сводится к четырем компонентам вещественного состава: кластическому, глинистому, карбонатному материалам и углистому веществу. При содержании данных компонентов свыше 50 % образуются, соответственно, кластические (обломочные), глинистые, карбонатные и углистые породы. С кластическими породами связано образование гранулярных коллекторов.

Указанные компоненты являются не только породообразующими, но и компонентами, определяющими физические свойства пород. Их влияние на физические свойства

пород отражено на треугольной диаграмме вещественного состава (рис. 3).

На данной диаграмме зависимости физических свойств пород от состава являются вполне однозначными, поскольку они установлены для интервалов разреза ограниченной мощности, в которых влияние катагенеза на физические свойства пород пренебрежимо мало [10]. Кроме катагенеза также учтено влияние температуры и минерализации пластовых вод на удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород.

Из диаграммы следует, что постепенному изменению компонентов состава соответствует плавное изменение петрофизических параметров. Общая пористость пород закономерно растет с уменьшением содержания карбонатного материала и увеличением содержания кластического материала. При этом рост содержания кластического материала сопровождается увеличением размера обломочных зерен и сменой кластических пород от алевролитов к песчаникам и далее к конгломератам.

Лучшими гранулярными коллекторами являются некарбонатные обломочные породы с наибольшим содержанием и размером кластического материала. Данная картина изменения пористости характерна для всех стадий катагенеза. В метагенезе она коренным образом изменяется.

УЭС некарбонатных пород, приведенное к стандартным условиям температуры (t=20 ^{o}C) и минерализации пластовых вод (C=0,6 г/л), всегда растет с увеличением содержания кластического материала и его размера. Вид данной зависимости сохраняется на различных стадиях эпигенетического преобразования пород - изменяется лишь ее количественное выражение [14]. Их чего следует, что из некарбонатных пород лучшими коллекторами являются породы с максимальным значением УЭС. Рост содержания карбонатного и углистого компонентов увеличивает УЭС пород, кроме месторождений антрацитов, на которых углистый компонент уменьшает УЭС. Увеличение температуры и минерализации пластовых вод всегда приводит к уменьшению УЭС пород.

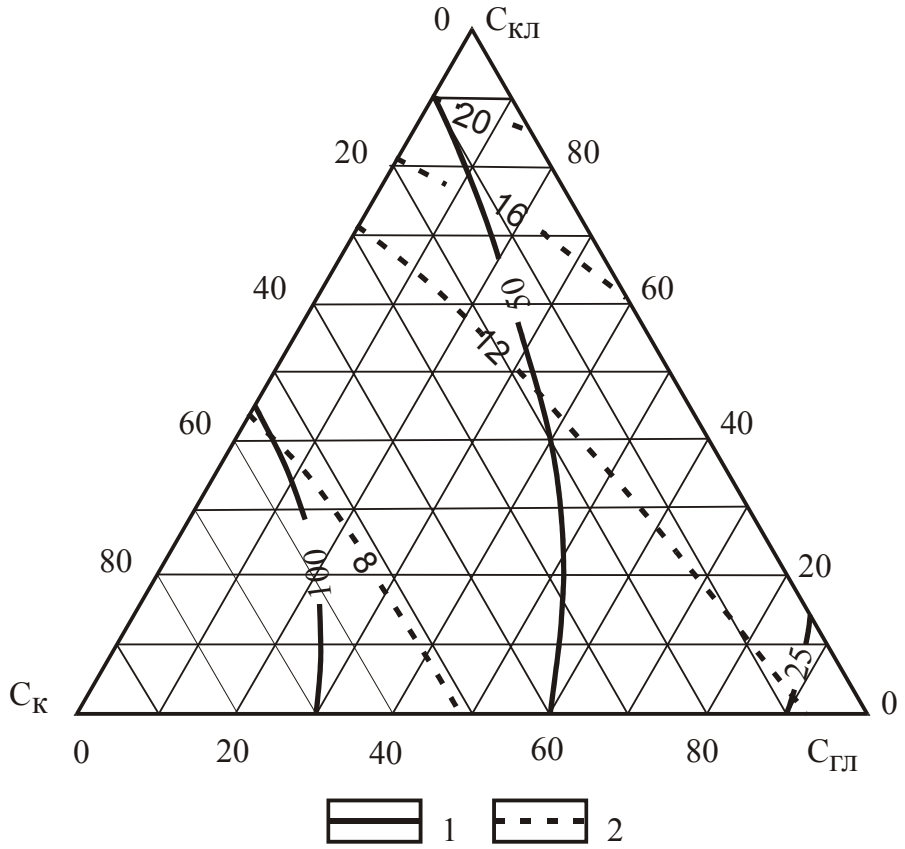

Рис. 3. Зависимость физических свойств угленосных пород от содержания в них кластического ($С_{кл}$), глинистого ($С_{гл}$) и карбонатного ($С_к$) материала. Донецкий каменноугольный бассейн, Павлоградско-Петропавловский угленосный район, участок Свидовской, VII (Г) стадия катагенеза пород, 6 литолого-геофизическая ступень: 1 – удельное электрическое сопро-тивление, приведенное к стандартным условиям температуры (t=20 ^{o}C) и минерализации пластовых вод (С=0,6 г/л), Ом·м; 2 – общая пористость, %

Кроме того, минерализация пластовых вод свыше 5-10 г/л на начальных стадиях катагенеза преобразует зависимости УЭС от содержания и размера кластического материала. Состоит данное преобразование в смещении максимума УЭС от наиболее крупнозернистых пород к алевролитам. Поэтому породы с лучшими коллекторскими свойствами при таких условиях уже не характеризуются максимальным значением УЭС, и к тому же по

УЭС они перестают отличаться от глинистых пород. Поэтому выделить породы-коллекторы становится возможным по УЭС в комплексе с другим геофизическим параметром. Из электрофизических свойств таким параметром может быть вызванная поляризация пород.

Определению гранулярных пород-коллекторов по УЭС мешают две группы факторов. Первая группа представлена степенью эпигенетических преобразований пород, температурой и минерализацией пластовых вод. Изменение этих факторов в объеме месторождения происходит плавно и предсказуемо. Их проявление легко устанавливается по нескольким углеразведочным скважинам. Поэтому данная группа факторов поддается количественному учету и не препятствует определению пород-коллекторов по УЭС. Исключение составляют лишь случаи с высокой минерализацией пластовых вод на начальных стадиях катагенеза (угли Д-Г).

Во вторую группу факторов включены карбонатный и углистый компоненты, представленные рассеянной и концентрированной формой нахождения. Предсказуемым появлением в разрезе характеризуется концентрированная форма данных компонентов в виде пластов угля и известняка. Рассеянное углистое вещество в редких случаях достигает содержания, заметно влияющего на УЭС пород, поэтому его ролью можно пренебречь. Карбонатный материал, кроме пластов известняка, образует конкреции и цемент пород, предсказать появление которых в разрезе не представляется возможным. Из-за непредсказуемости карбонатного компонента определение пород-коллекторов по УЭС является неоднозначным.

Газоносность и трещиноватость пород являются факторами, которые локально влияют на УЭС и накладываются на рассмотренные выше общие закономерности изменения УЭС пород. Выделяются они по существенному отклонению значений УЭС от петрофизических закономерностей.

Таким образом, результаты петрофизических исследований свидетельствуют, что изменение УЭС зависит от ряда геологических факторов, для учета которых разработаны соответствующие приемы. Однако однозначно определять

коллекторские свойства пород по одному параметру УЭС не представляется возможным, в связи с непредсказуемым поведением в разрезе карбонатного компонента и существованием условий повышенной минерализации пластовых вод на начальных стадиях катагенеза. Достоверное решение задачи возможно при использовании УЭС вместе с другими петрофизическими параметрами, устраняющими существующую неоднозначность. Задача также может найти решение при смене породного уровня исследования надпородным, представленным осадочными толщами.

Физические свойства угленосных толщ. Результаты геофизических исследований скважин в различных районах Донбасса свидетельствуют о делимости угленосного разреза на слои, мощность которых чаще всего изменяется от нескольких дециметров до одного метра [11, 12, 13]. Для метода ЗСБ интерес представляют не эти слои, а их ассоциации в виде толщ мощностью в несколько десятков метров, выделяемые по физическим свойствам.

Делимость разреза на толщи определялась методом скользящего окна по данным геолого-геофизических исследований угольных скважин глубиной до 3000 м [14]. При этом окно размером 100 м с шагом 20 м перемещалось по разрезу, и в нем подсчитывалось содержание типов пород по их мощности. Данный метод позволил построить схему измерения физических параметров, применяемую в геофизических исследованиях скважин. В результате была получена картина физической делимости разреза на толщи разного состава.

В соответствии с ней разрез представляет собой чередование толщ двух типов – относительно крупнозернистых и тонкозернистых. Крупнозернистые толщи содержат 15-80 % песчаников, 0-40 % алевролитов и 15-60 % аргиллитов. В тонкозернистых толщах содержание песчаников снижается до 0-25 %, алевролиты по-прежнему составляют 0-40 %, аргиллиты достигают 50-95 %. Мощность выделенных толщ варьирует от 60 до 270 м.

Главной особенностью изменения состава толщ является увеличение содержания песчаников (от 0 до 80 %) за счет

уменьшения аргиллитов (от 95 до 15 %). Интервалы указанного изменения являются весьма существенными, и поэтому способны заметным образом влиять на физические свойства толщ. Содержание известняков и углей, составляющее первые проценты, не способно сильно изменить физические свойства толщ. Отсюда вытекает важное для изучения пород-коллекторов следствие: изменение физических свойств толщ является отражением содержания в них песчаных и глинистых пород.

Выше показано, что карбонатный компонент является мешающим фактором при определении пород-коллекторов по УЭС. В толщах распространенность пород, содержащих более 10 % карбонатного компонента, составляет около 10 % [11, 12, 13]. Поэтому при переходе от породного уровня исследования к уровню осадочных толщ резко изменяется роль карбонатного компонента. Из мешающего фактора он превращается в фактор с пренебрежимо малым влиянием на УЭС осадочных толщ.

Таким образом, слоям угленосных пород свойственно группироваться в толщи, мощность и изменение состава которых делают их доступными изучению методом ЗСБ.

Особенности строения угленосных толщ. Песчаные пласты, входящие в состав толщ, имеют близкую с ними или в несколько раз меньшую мощность. Практический интерес представляют коллекторские свойства песчаных пластов. Поэтому возникает вопрос, который можно сформулировать как определение свойств элемента (песчаного пласта) по общим свойствам системы (толщи).

В угольной геологии разработаны методы формационного анализа [15], которые, по сути, представляют собой приложение метода системного анализа к угленосным отложениям. Данные методы позволяют по признакам большого геологического образования определять характеристики составляющих его элементов меньшего размера. Так по составу и строению седиментационного цикла первого порядка определяется качество входящего в него угольного пласта, циклов второго порядка – мощность угольных пластов [10].

Использование методов формационного анализа предполагает знание фациальных условий образования

угленосных отложений. Определение фаций не входит в задачу углеразведки. Однако они могут быть определены по данным ГИС. Примером широкого использования ГИС для определения фаций являются нефтегазоносные и угленосные отложения карбона Днепровско-Донецкой впадины [16, 17]. Предпосылки определения фаций по гранулометрической кривой разреза скважины, построенной по данным ГИС, существуют и для Донбасса [14]. Поэтому вполне решаемой является задача построения фациально-циклической модели шахтного поля на основе использования ГИС.

Фациально-циклическая модель позволит в осадочных телах, выделенных по данным ЗСБ, провести дополнительные геологические границы седиментационных циклов, определить их фациальную природу и затем, используя возможности формационного анализа, выполнить прогноз качества гранулярных коллекторов в трехмерном породном массиве.

ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено:

1. Трехмерное исследование углепородного массива является необходимым, поскольку сеть углеразведочного бурения пропускает экстремумы латеральной изменчивости пород-коллекторов, благоприятные для расстановки дегазационных скважин.

2. В комплекс методов разведочной геофизики целесообразно включить метод ЗСБ, раскрывающий картину трехмерного изменения электрофизических свойств углепородного массива, а также МОГТ, позволяющий построить структурный каркас массива и выделить в нем зоны трещиноватости.

3. На надпородном уровне организации вещества отчетливо проявляется связь удельного электрического сопротивления толщ с содержанием в них пород-коллекторов, что открывает возможность данные 3-D электроразведки трансформировать в показатели содержания пород-коллекторов.

4. Методы формационного анализа и ГИС позволяют от свойств угленосной толщи перейти к качеству содержащихся в ней пород-коллекторов.

5. Данные предпосылки служат основанием для последующей разработки комплексной геолого-геофизической методики изучения качества коллекторов на угольных месторождениях, по данным методов ЗСБ, МОГТ и ГИС.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Газоносность угольных месторождений Донбасса / Анциферов А.В., Тиркель М.Г., Хохлов М.Т., Привалов В.А., Голубев А.А., Майборода А.А., Анциферов В.А. / Под ред. Н.Я. Азарова. – К.: Наук. думка, 2004. – 231 с.
2. Методика разведки угольных месторождений Донецкого бассейна. – М.: Недра, 1972. – 351 с.
3. Верповский Н.Н., Гладченко Ю.А., Музыка В.В., Полохов В.М. Применение наземних геофизических исследований в комплексе работ по решению проблемы дегазации шахтных полей и поискам скоплений метана в углевмещающей толще // Горная геология, геомеханика и маркшейдерия: Сб. научн. докл. УкрНИМИ НАН Украины. – Донецк, 2004. – С. 170-178.
4. Левашов С.П., Якимчук М.А., Корчагін І.М., Дегтяр Р.В., Піщаний Ю.М., Божежа Д.М. Про можливості виявлення та картування зон підвищеного газонасичення вугілля та гірських порід геоелектричними методами // Геоінформатика. – 2005. – № 3. – С. 19-23.
5. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Таскибваев К.М. Геоэлектрические исследования нефтеносных надсолевых и подсолевых отложений купольной структуры Карсак (Западный Казахстан) // Геоінформатика. – 2004. – № 3. – С. 28-32.
6. Левашов С.П., Битеуова С.А., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Таскинбаев К.М. Геоэлектрические исследования на месторождениях угеводородов Западного Казахстана:

сопоставление с данными сейсморазведки и бурения // Труды IV Междунар. конф. “Геодинамика и нефтегазоносные структуры Черноморско-Каспийского региона”. – Симферополь, 2002. – С. 275-277.

7. Бучаров Б.В., Бессонов А.Д., Горячев В.В. Технологии комплексных геофизических исследований при решении инженерно-геологических задач // Труды II Междунар. науч.-практ. конф. “Инженерная геофизика”. – Геленджик. – 2006. – С. 9-11.
8. Дмитриев Ю.Ю. Исследование массива горных пород методом электромагнитных зондирований становлением поля // Горная геология, геомеханика и маркшейдерия: Сб. научн. докл. УкрНИМИ НАН Украины. – Донецк, 2004. – С. 208-212.
9. Дмитриев Ю.Ю. Новые технологии геофизических исследований для наклонно-направленного бурения при переходе нефтепроводов через реки // Труды II Междунар. науч.-практ. конф. “Инженерная геофизика”. – Геленджик. – 2006. – С. 51-53.
10. Гречухин В.В. Петрофизика угленосных формаций. – М.: Недра, 1990. – 472 с.
11. Гречухин В.В. Воевода Б.И., Савченко А.В., Дараган В.Н., Иванов Л.А. Литологические и петрофизические исследования отложений антрацитовых месторождений Донбасса // Литология и полезные ископаемые. – 1987. – № 4. – С. 53-70.
12. Гречухин В.В., Воевода Б.И., Дараган В.Н., Савченко А.В., Иванов Л.А., Лишин В.П., Пашков А.Е., Пашкова З.Г. Литологические и петрофизические исследования угленосных отложений в Западном Донбассе // Советская геология. – 1992. – №4. – С. 65-71.
13. Гречухин В.В., Воевода Б.И., Дараган В.Н., Савченко А.В., Иванов Л.А. Петрофизические характеристики отложений с коксующимися углями Донбасса // Советская геология. – 1986. – № 9. – С. 99-108.
14. Гречухин В.В. Иванов Л.А., Воевода Б.И. Дараган В.Н. Савченко А.В. Гранулометрические и петрофизические

закономерности угленосных пород Донецкого бассейна // Советская геология. – 1990. – № 1. – С. 67-76.
15. Методы формационного анализа угленосных толщ / Под ред. Г.А. Иванова, Н.В. Иванова. – М.: Недра, 1975. – 200 с.
16. Притулко Г.И., Шилова А.М. Предпосылки оценки фациальной принадлежности отложений по данным геофизических исследований скважин // Геофизическая диагностика нефтегазоносных и угленосных разрезов: Сб. научн. тр. ИГГГИ АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1989. – С. 18-33.
17. Изотова Т.С., Денисов С.Б., Вендельштейн Ю.Б. Седиментологический анализ по данным геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1993. – 176 с.