

УДК 550.83:553.94

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ЛИТОЛОГО-АКУСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗРЕЗОВ СКВАЖИН НА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

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

За основу побудови моделей прийнято розподіл за розрізом свердловини типів порід і розподіл чинників, що визначають фізичні властивості порід, а також використання петрофізичних закономірностей, обумовлених даними чинниками.

As the basis for model generation, well column distribution of rock types and distribution of factors, which determine physical properties of rocks, has been taken as well as the use of petrophysical regularities resulting from these factors.

При решении задач углеразведки и угледобычи постоянно растет роль сейсморазведки. Особенно остро стоят вопросы выявления малоамплитудных нарушений угольных пластов и локальных скоплений метана в межскважинном пространстве [1]. Решение данных задач традиционным методом разведочного бурения не представляется возможным, поскольку указанные геологические объекты имеют небольшие размеры, а бурение дополнительных скважин является дорогостоящим мероприятием. Поэтому для решения таких задач используется разведочная геофизика и в частности, ее наиболее перспективный метод – сейсморазведка методом отраженных волн (МОВ).

Основой использования МОВ являются результаты исследования разрезов скважин и, в частности, данные акустического каротажа (АК) и вертикального сейсмического

профилирования (ВСП). По этим данным строятся литолого-акустические модели (ЛАМ) разрезов скважин [2]. Роль наземной сейсморазведки при этом сводится к интерполяции полученных ЛАМ между скважинами и их экстраполяции на участки, не охарактеризованные бурением [3].

При наличии некоторого числа скважин, для которых известны значения искомым петрофизических параметров и значения свойств (атрибутов) отраженных волн, становится возможной постановка задачи атрибутивного анализа, заключающаяся в количественном прогнозе петрофизических характеристик пород по сейсмическим атрибутам вне скважин. В решении обратной динамической задачи, являющейся альтернативой атрибутивному анализу, добиваются сходства синтетических и реальных сейсмограмм. Основой обеспечения данного сходства служат априорные данные о слоистой акустической модели геологической среды, построение которой выполняется по результатам геологического и геофизического исследования скважин [4].

Современная 3D сейсморазведка обеспечивает построение надежных изображений среды, оценку строения и иногда продуктивности мощных пластов. Потребности нефтяной промышленности диктуют увеличение информативности метода до уровня детального изучения строения пласта. Достичь требуемой детальности возможно при использовании детальных моделей среды, построенных по скважинным данным [5].

Следовательно, на широком использовании результатов исследования скважин основываются современные способы решения задач при помощи МОВ. Скважинные данные также служат основой для разработки сейсморазведочных способов решения новых геологических задач, диктуемых повышенными требованиями промышленности. Поэтому роль скважинных данных с развитием сейсморазведки непрерывно растет.

На угольных месторождениях бурится по несколько сотен разведочных скважин и поэтому не должна была возникнуть проблема в обеспечении сейсморазведки скважинными данными.

Однако проблема существует и ее можно сформулировать как недостаточное обеспечение сейсморазведки данными АК и

отсутствие данных ВСП на разведанных месторождениях. При этом АК проводится примерно в 10 % скважин, ВСП – лишь на единичных месторождениях. К тому же редкая и нерегулярная сеть скважин, в которых был выполнен АК, способна дать лишь общую картину изменения скорости продольных волн в целом по стратиграфическому разрезу месторождения. Поэтому такое обеспечение сейсморазведки скважинными данными не позволяет использовать ее эффективно как средство интерполяции ЛАМ между разведочными скважинами.

Простым способом решения проблемы могло бы быть бурение дополнительных скважин и исследование их методами АК и ВСП. Однако из-за дороговизны бурения, такой способ становится неприемлемым.

Поэтому в качестве альтернативы бурению новых скважин под АК и ВСП предлагается литолого-петрофизический способ построения ЛАМ по данным неакустических методов геофизических исследований скважин.

Целью статьи является обоснование петрофизического подхода к построению ЛАМ разреза углеразведочной скважины. Данный подход предполагает использование закономерностей изменения физических свойств пород, обусловленных геологическими факторами, проявившими себя в данном разрезе скважины.

По области охвата геологического разреза факторы подразделяются на повсеместные и локальные. К повсеместным факторам относится первичная (генетическая) и вторичная (эпигенетическая) группы факторов, выделяемые В.В. Гречухиным [6], и современная глубина залегания пород. Локальные факторы представлены структурным несогласием, дизъюнктивными дислокациями, динамометаморфизмом (катакластическим метаморфизмом), гипергенезом. В других случаях перечень факторов может быть расширенным за счет локального метаморфизма (контактово-термального и метасоматоза) и техногенеза, или сокращенным в случаях отсутствия структурных несогласий и дизъюнктивных дислокаций. Минимальное количество факторов состоит из

первичной и вторичной группы, современного гипергенеза и глубины залегания пород.

Качественная модель изменения петрофизического параметра по разрезу скважины определяется областями действия конечного числа факторов (рис.1).

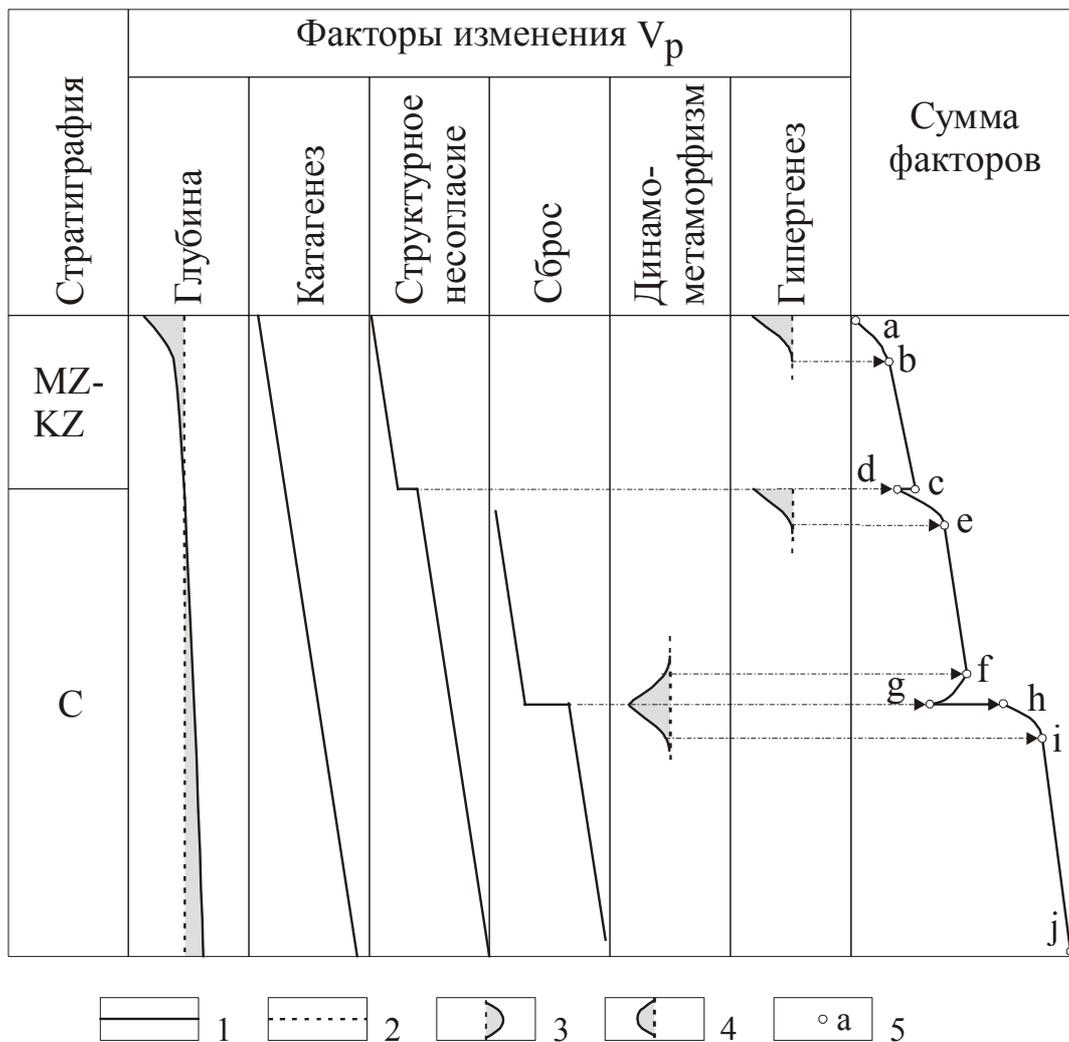


Рис. 1. Качественная модель изменения скорости распространения продольных упругих волн (V_p) однотипной породы по разрезу скважины: 1 – линии аппроксимации изменения параметра V_p по разрезу скважины; 2 – линии фоновое значение параметра V_p ; 3 – положительное отклонение параметра V_p от фонового значения; 4 – отрицательное отклонение параметра от фонового значения; 5 – ключевые точки графика

Количественное выражение модель приобретает на основании использования петрофизических закономерностей, обусловленных данными факторами.

Первичная группа факторов представлена вещественным и гранулометрическим составом пород, вторичная – максимальными термодинамическими условиями и поровыми растворами пород, возникшими в период максимального тектонического погружения отложений. Влияние первичной группы факторов однозначно устанавливается в пределах интервалов разреза, размер которых ограничивается изменением петрофизического параметра однотипной породы на величину, не превышающую погрешность измерения параметра геофизическими методами [6, 7].

В таких интервалах с увеличением среднего размера зерен (d_3) и содержания кластического материала ($C_{\text{кл}}$) закономерно уменьшается объемная плотность и закономерно, но по более сложному закону, изменяется скорость распространения продольных упругих волн (V_p) угленосных отложений с ограниченным содержанием карбонатного ($C_{\text{к}} \leq 5\%$) материала и органических ($C_{\text{орг}} \leq 5\%$) примесей (рис. 2).

Форма линий аппроксимации $V_p=f(d_3)$ с увеличением степени катагенеза претерпевает коренное изменение: абсолютный максимум параметра V_p из середины графика переходит в его крайнее правое положение. Подобным образом изменятся и форма кривых $V_p=f(C_{\text{кл}})$. Это означает, что в ходе катагенеза максимум параметра V_p постепенно переходит от алевролитов к наиболее крупнозернистым разностям песчаников. Перемещение максимума параметра V_p объясняется увеличением роли общей пористости в его изменении на низких стадиях катагенеза [8].

Увеличение содержания карбонатного материала обуславливает увеличение параметра V_p , увеличение содержания органического вещества – уменьшение данного параметра.

Влияние вторичной группы факторов проявляется в изменении пород, однотипных по составу. Для угленосных отложений карбона данное изменение в количественном виде прослежено по разрезам отдельных скважин, сводному петрофизическому разрезу Донбасса и по площади

распространения узкого стратиграфического интервала, содержащего угольный пласт k_5 .

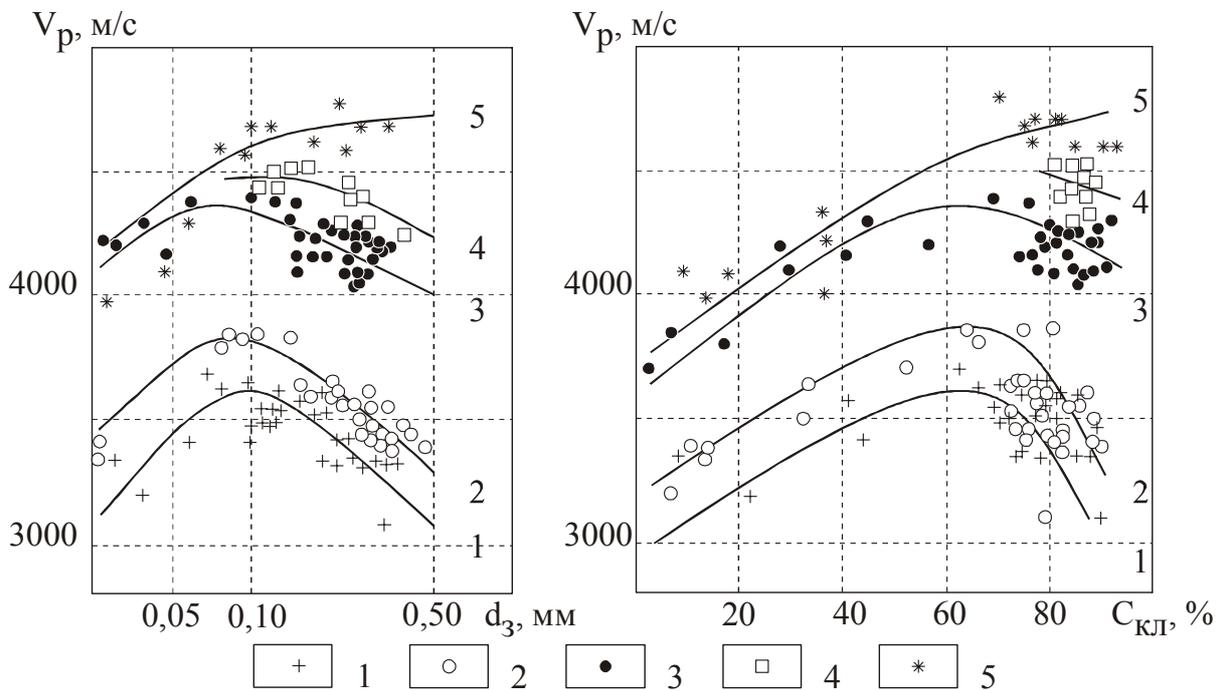


Рис. 2. Зависимость скорости распространения упругих продольных волн (V_p) от размера обломочных зерен (d_3) и содержания кластического материала ($C_{кл}$) для различных интервалов зоны катагенеза. Донецкий бассейн, Красноармейский угленосный район, Очеретинская глубокая скважина К-900. Содержание в породах карбонатного материала и органического вещества не более 5 % каждого. Шифр кривых – интервал исследования (стадия катагенеза пород): 1 – от 210 до 320 м (середина V-VI стадии); 2 – от 435 до 545 м (конец V-VI стадии); 3 – от 800-890 м (середина VII стадии); 4 – от 1080 до 1125 м (вторая половина VII стадии); 5 – от 1185 до 1295 м (конец VII₁ стадии)

Петрофизические разрезы и карты свидетельствуют, что с увеличением глубины максимального доинверсионного погружения происходит закономерное увеличение плотности и скорости распространения продольных упругих волн однотипных пород [6].

Первичная и вторичная группы факторов определяют общее изменение петрофизических параметров, на фоне которого происходит влияние других факторов.

Фактор современной глубины отражает влияние на физические свойства пород упругой деформации, обусловленной эффективным давлением и температурой в момент измерения физических параметров. При этом существенное значение имеет изменение упругих свойств пород, тогда как изменением плотностных свойств можно пренебречь.

Измерение эффективного давления в углеразведочных скважинах практически не производится, поэтому в качестве общего параметра, отражающего изменение эффективного давления и температуры, принята современная глубина залегания пород (H).

Влияние фактора H на параметр V_p выявлено по 25 параметрическим скважинам, расположенным в различных районах Донбасса с пологим залеганием пород. В этих скважинах к диаграммам АК точно привязывались керновые пробы (около 2,5 тысяч проб), по которым под поляризационным микроскопом определялся состав пород и лабораторным методом (ГОСТ 2160-82, ГОСТ 6427-75) общая пористость [9].

По вещественному составу выделялись однотипные породы, которые дополнительно по общей пористости подразделялись на типы с равной пористостью. При помощи выделения пород одновременно однотипных по составу и пористости учитывалось влияние на параметр V_p соответственно первичной и вторичной групп факторов, а оставшиеся изменения параметра V_p связывались с фактором H и погрешностью измерения.

Установлено, что фактор H всегда увеличивает параметр V_p на величину, которая зависит от абсолютного значения данного фактора, показателей состава и степени катагенеза пород (рис.3). Влияние абсолютной величины фактора H проявляется в образовании двух глубинных зон, граница между которыми проходит на глубине 250 м и выделяется по резкому перегибу кривых $V_p=f(H)$. В верхней зоне, по мере приближения к поверхности земли, происходит значительно большее изменение параметра V_p , чем в зоне, расположенной ниже.

В нижней зоне влияния фактора H на параметр V_P закономерно ослабевает за счет увеличения степени катагенеза, а также за счет уменьшения показателей $C_{КЛ}$ и d_3 в рассматриваемых типах пород. При этом на увеличение степени катагенеза указывает уменьшение пористости однотипных пород.

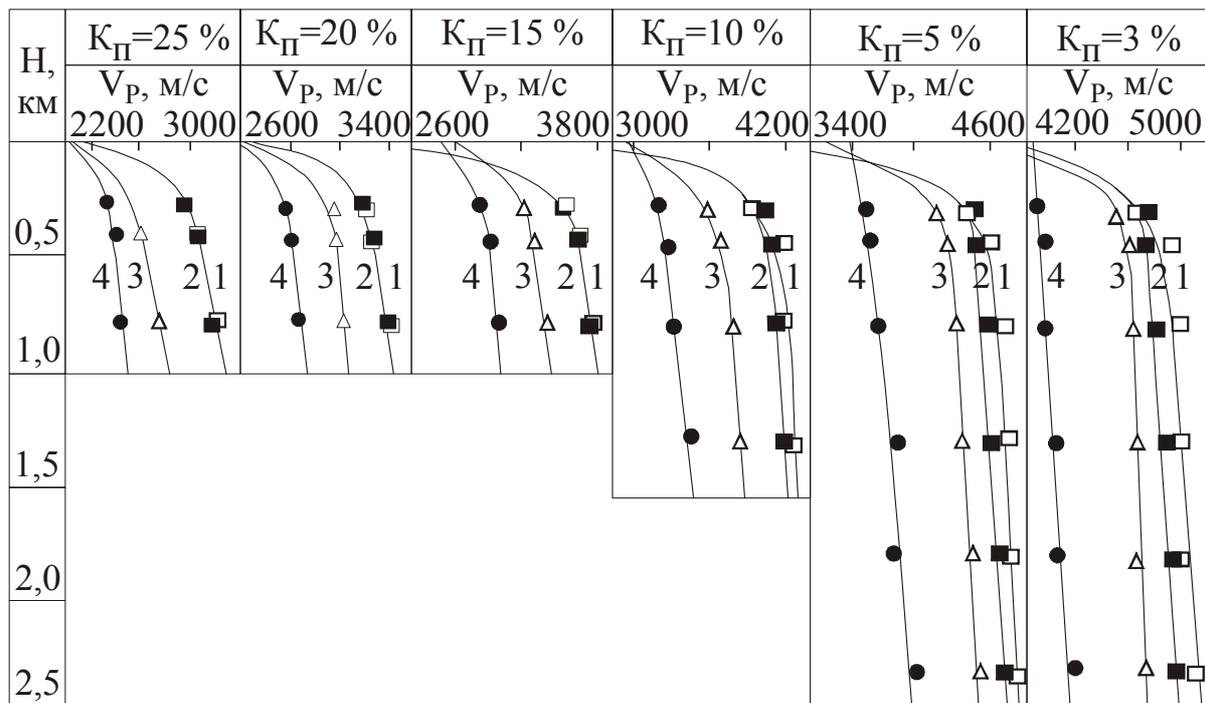


Рис. 3. Влияние современной глубины (H) на скорость распространения упругих продольных волн (V_P) пологозалегающих угленосных отложений Донбасса одинаковых по составу и общей пористости (K_{II}) с содержанием карбонатного материала и органического вещества до 5% каждого: 1 – песчаник среднезернистый; 2 – песчаник мелкозернистый; 3 – алевролит; 4 – аргиллит

На основании закономерностей изменения параметра V_P , обусловленных упругой деформацией, построены палетки приведения параметра V_P к общей глубине, равной 500 м.

Структурное несогласие скачкообразно нарушает петрофизический разрез, разделяя его на две части, если доинверсионная глубина погружения верхнего комплекса пород была меньшей нижнего комплекса. Поэтому упругие и плотностные свойства однотипных пород в подобных разрезах

выше границы несогласия являются систематически меньшими, чем в комплексе ниже несогласия. В Донбассе данные случаи имеют широкое распространение, например, на границе карбона и мезокайнозойского покрова в Западном Донбассе.

Изменение физических свойств однотипных пород в данных разрезах определяется двумя максимумами погружения: первым, обусловившим погружение нижнего комплекса и вторым, сформировавшим верхний комплекс, но не повлекшим изменение нижнего комплекса. В случае большей или равной величины доинверсионного погружения верхнего и нижнего комплекса структурное несогласие на петрофизическом разрезе не отражается, так как изменение физических свойств однотипных пород выше и ниже несогласия определяется одной величиной доинверсионного погружения, достигшей максимума в момент погружения верхнего комплекса пород.

К скачкообразному изменению петрофизического разреза приводит и дизъюнктивная дислокация. Она разделяет разрез на два крыла и смещает их в разные стороны. В результате в лежащем крыле сброса упругие и плотностные свойства однотипных пород имеют положительно систематическое смещение по сравнению с висячим крылом. В надвигах и взбросах, наоборот, данное смещение является отрицательным.

Дизъюнктивные дислокации обуславливают дополнительное изменение пород в приразломной зоне, рассматриваемое как процесс динамометаморфизма. В результате динамометаморфизма вблизи сместителя образуется трещиноватость и на некотором удалении от него закономерное изменение физических свойств пород. Уменьшением упругих и плотностных свойств характеризуется сброс и лежащее крыло надвига, увеличением – висячее крыло надвига. Величина относительного изменения данных физических параметров составляет от 1 до 10 %. Ширина зоны, в которой фиксируются изменения физических свойств, составляет несколько десятков метров. Изменение ширины данной зоны и физических параметров зависит от степени катагенеза и амплитуды смещения разрывного нарушения [10].

Современный гипергенез обуславливает уменьшение упругих и плотностных свойств ниже поверхности земли, древний гипергенез – ниже поверхности структурного несогласия, ранее являвшейся древней поверхностью земли. В зоне древнего гипергенеза относительная величина уменьшения упругих и плотностных свойств составляет около 10 %, а глубина распространения – первые десятки метров.

Суммарное влияние повсеместных и локальных факторов формируют результирующую кривую изменения физического параметра однотипной породы. В типичном для Западного Донбасса случае, представленном на рис.1, изменение параметра V_p вниз по разрезу скважины определяется следующими факторами: современным гипергенезом (интервал a-b), катагенезом мезоканозойских отложений (b-c), структурным несогласием между карбоном и мезокайнозойем (c-e), древним гипергенезом ниже поверхности карбона (d-e), катагенезом карбона в висячем крыле сброса(e-f), смещением крыльев сброса (f-i), динамометаморфизмом в висячем (f-g) и лежащем (g-h) крыле сброса и катагенезом карбона в лежащем крыле (h-j).

Суммарные кривые, полученные для всех типов пород, и распределение пород по разрезу скважины, установленное по данным ГИС, позволяют строить ЛАМ различной детальности.

На рисунке 4 приведена ЛАМ разреза 3-го блока шахты “Западно-Донбасская”, построенная по данным литологического и петрофизического разрезов. При этом литологический разрез является укрупненным. Построен он в результате объединения близких по составу слоев, выделенных по данным ГИС. Петрофизический разрез представлен графиками изменения объемной плотности насыщенных водой пород (δ_H), скорости распространения упругих волн (V_p) и акустической жесткости (Z) однотипных по составу пород.

На данной модели приведена литологическая колонка и синонимика основных маркирующих горизонтов, образующие стратиграфический разрез объекта исследования. Стратиграфический разрез является обязательным элементом ЛАМ, поскольку позволяет петрофизические данные распространять по площади объекта работ.

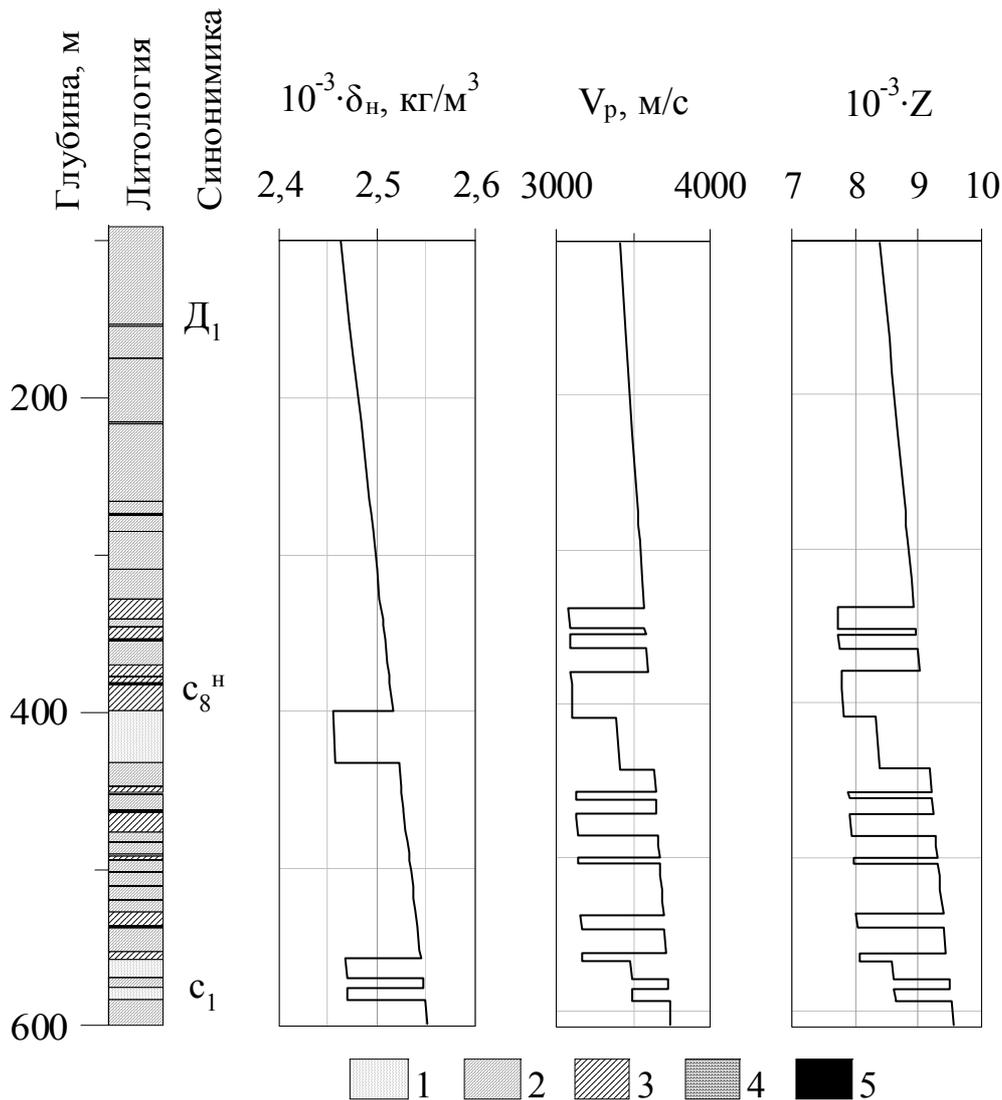


Рис. 4. Литолого-акустическая модель разреза 3-го блока шахты “Западно-Донбасская”: δ_n – объемная плотность насыщенных водой пород; V_p – скорость распространения продольных упругих волн (по данным АК); Z – акустическая жесткость; 1 – песчаник; 2 – алевролит; 3 – аргиллит; 4 – известняк; 5 – уголь

Изменение петрофизических параметров в ЛАМ происходит в непрерывной последовательности залегания пород и зависит от их состава и степени катагенеза. В результате укрупнения разреза на нем остались лишь основные типы пород – аргиллиты, алевролиты и песчаники, на долю которых приходится около

95 % разреза. Известняки и угольные пласты из-за незначительной распространенности в ЛАМ не включены, однако часть из них приведена в стратиграфическом разрезе.

Параметр δ_H вниз по ЛАМ разреза пилообразно увеличивается, образуя минимумы против песчаных пластов. Прямой характер графика за пределами песчаников, объясняется близкими значениями аргиллитов и алевролитов по параметру δ_H . Наклон графика к оси глубин обусловлен влиянием катагенеза на однотипные породы.

Параметр V_p также пилообразно увеличивается вниз по разрезу, однако с большим числом аномалий, чем параметр δ_H . При этом большинство аномалий данных параметров не совпадает. Совпадение аномалий происходит только против песчаников. Более сложная кривая параметра V_p обусловлена отчетливой дифференциацией аргиллитов и алевролитов по данному параметру. При этом максимальным аномалиям соответствуют алевролиты, минимальным – аргиллиты. Промежуточное положение занимают песчаники.

Параметр Z изменяется по разрезу, имея кривую по форме весьма сходную с V_p . На фоне непрерывного увеличения параметра Z вниз по разрезу образуются максимумы аномалий против алевролитов и минимумы против аргиллитов. Песчаники по параметру Z занимают промежуточное положение между аргиллитами и алевролитами. Поэтому наиболее контрастное изменение параметра Z происходит на границе алевролит – аргиллит. Меньшей контрастностью характеризуется граница алевролит – песчаник и еще меньшей – аргиллит – песчаник.

ЛАМ разреза скважины, построенная по литолого-петрофизическим данным, подтверждается результатами акустического каротажа, что свидетельствует о достаточном учете геологических факторов и достоверности петрофизических закономерностей, используемых для построения ЛАМ.

ЛАМ, отражая природные закономерности изменения литологического состава и акустических свойств пород, позволяет обеспечить сейсморазведку следующими априорными данными:

- а) установить скоростной закон разреза;

- б) отождествить отражающие горизонты с геологическими; границами;
- в) привязать отражающие горизонты к стратиграфическому разрезу;
- г) дать литологическую и петрофизическую характеристику геологическим объектам, выделенным по сейсмическим данным;
- д) экстраполировать данные о литологии и коллекторских свойствах геологических объектов по сейсмическим профилям.

ВЫВОДЫ

1. Литолого-акустическая модель (ЛАМ) позволяет обобщенную физико-геологическую характеристику угольного месторождения приблизить к конкретным условиям разреза скважины и использовать сейсморазведку как инструментарий, выполняющий интерполяцию ЛАМ между скважинами и их экстраполяцию на участки, не охарактеризованные бурением.

2. ЛАМ угольных скважин, в которых не проводились акустические и сейсмоакустические исследования, могут быть построены по данным распределения по разрезу скважины типов пород и факторов изменения их физических свойств, а также на основании петрофизических закономерностей, обусловленных выявленными факторами.

3. Дальнейшее развитие петрофизического подхода к построению ЛАМ связано с решением некоторых слабоизученных вопросов, таких как петрофизика кайномезозоя, гипергенеза, контактово-термального метаморфизма, а также с проведением картирования изменений сейсмоакустических свойств пород, измеренных в условиях их естественного залегания.

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. - К.: Наук. думка, 2004. - 232 с.

2. Миколаевский Э.Ю., Сохранов Н.Н. Определение жесткости сред при построении литолого-акустических моделей разреза скважин // Геофизика. – 1996. - № 5-6. – С. 81-84.
3. Разведка нефтяных и газовых месторождений / Е.А. Козлов, О.Л. Кузнецов, Е.А. Галаган, И.А. Мушин // Комплексование методов разведочной геофизики: Справочник геофизика / Под ред. В.В. Бродового, А.А. Никитина. – М.: Недра, 1984. – С. 112-126.
4. Авербух А.Г. Научные достижения Н.Н. Пузырева и развитие нефтегазовой сейсморазведки // Сборник докладов Международной научной конференции, посвященной 90-летию академика Н. Н. Пузырева. – Новосибирск, 2004. – С. 9-20.
5. Табаков А.А. Трехмерные системы наблюдений и модель-базированная обработка в сейсморазведке – ответ на вызов нефтяной промышленности XXI века // V научно-практическую конференцию "Гальперинские Чтения – 2005" / www.geovers.ru
6. Гречухин В.В. Изучение угленосных формаций геофизическими методами. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
7. Гречухин В.В. Петрофизика угленосных формаций. – М.: Недра, 1990. – 472 с.
8. Иванов Л.А. Воевода Б.И. Инверсия угленосных пород Донбасса в катагенезе по значению скорости распространения упругих продольных волн // Наукові праці ДонНТУ: серія гірничо-геологічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Випуск 72. - С. 169-175.
9. Иванов Л.А., Воевода Б.И. Современная глубина как фактор изменения скорости распространения упругих продольных волн V_p угленосных пород Донбасса // Наукові праці ДонНТУ: серія гірничо-геологічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2003. – Випуск 63. - С. 127-133.
10. Фоменко Н.К. Геолого-геофизические признаки разрывных нарушения в разрезах скважин. – Вестник Московского университета. – 1975. – № 5. – С. 118-121.