

Петроскоростной разрез Донецкого угольного бассейна

©2025 Л. А. Иванов, В. В. Туманов, И. Ю. Николаев[✉]

**Федеральное государственное научное учреждение «Республиканский
академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркинговского дела»
(РАНИМИИ) ул. Челюскинцев, 291, 243001, Донецк, Российская Федерация**

Аннотация

Введение: в последнее время актуальность приобретает использование сейсморазведки для поисков опасных скоплений метана на угольных месторождениях. Для их выявления необходимо иметь достаточно точное представление о скорости распространения упругих продольных волн в породе (V_p) и в ее скелете ($V_{p,sk}$), а также упругих поперечных волн (V_s). Несмотря на масштабные исследования прошлых лет, практически нерешенными остались вопросы изучения параметров $V_{p,sk}$ и V_s . Поэтому для петрофизического обеспечения сейсморазведочных работ проведено исследование комплекса петроскоростных характеристик и закономерностей их изменения по сводному разрезу бассейна.

Методика: сводный петроскоростной разрез строился путем наращивания частных разрезов по величине максимального доинверсионного погружения пород (H_{max}). Величина H_{max} определялась по показателям качества углей, V_p – по акустическому каротажу; $V_{p,sk}$ – по уравнению Уайли, V_s – по корреляционной связи с V_p . При обосновании закономерностей изменения петроскоростных параметров использовались данные о структурно-минералогических особенностях обломочных и глинистых пород.

Результаты и обсуждение: построен петроскоростной разрез угольного бассейна в виде семейства кривых изменения коэффициента общей пористости, минералогической плотности, содержания вторичного кварца, трещиноватых и расколотых зерен, параметров V_p , $V_{p,sk}$ и V_s в зависимости от H_{max} . Установлены причины образования инверсии обломочных пород по скоростным параметрам и роста данных параметров для глинистых пород с постоянной пористостью.

Заключение: петроскоростной разрез построен для всех гранулометрических разностей и стадий постдиагенетического преобразования угленосных отложений Донбасса. Конкретизированы причины постдиагенетического увеличения скоростных параметров в виде уменьшения пористости и упрочнения скелета породы. Установлено, что инверсия пород по скоростным параметрам на границе стадий 2Г и 3Г обусловлена увеличением $V_{p,sk}$ за счет роста протяженности контактов обломочных зерен ниже указанной границы. Показано, что постдиагенетическое увеличение параметра $V_{p,sk}$ аргиллитов при постоянной пористости обусловлено упрочнением контактов и увеличением минералогической плотности глинистых частиц.

Ключевые слова: угольный бассейн, петроскоростной разрез, пористость и скелет породы, размер и контакты зерен, постдиагенетическое преобразование, инверсия, аномальные скопления метана.

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках научной темы FRSR-2023-0007 «Разработка геолого-геофизической модели формирования аномальных скоплений метана на угольных шахтах в зонах динамического влияния разломов».



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Николаев Иван Юрьевич, e-mail: nikolaev@yandex.ru

Для цитирования: Иванов Л. А., Туманов В. В., Николаев И. Ю. Петроскоростной разрез Донецкого угольного бассейна // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2025. № 3. С. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/3/41–50>

Введение

В последнее время актуальность приобретает использование сейсморазведки для поисков аномальных скоплений метана. Данные скопления одновременно являются опасными при добыче угля и полезными как альтернативный источник метана. Для их выявления необходимо иметь достаточно точное представление о скорости распространения упругих продольных (V_p) и поперечных волн (V_s), а также скорости распространения продольных упругих волн в скелете породы ($V_{p,sk}$) [1].

В 70-80 гг. прошлого столетия в Донбассе выполнялись систематические петрофизические исследования для решения задач угольной разведки (литологии, физико-механических свойств, устойчивости пород, качества углей) геофизическими методами исследования скважин. При этом стандартный набор петрофизических параметров состоял из коэффициента общей пористости (K_p), минералогической плотности (δ_m), объемной плотности абсолютно сухих (δ_s) и насыщенных водой (δ_n) пород, интенсивности естественного гаммаизлучения (I_γ), удельного электрического сопротивления (ρ_p) и V_p . Данные параметры определялись лабораторными ($K_p, \delta_m, \delta_s, \delta_n$) и геофизическими методами исследования скважин (I_γ, ρ_p, V_p). Параллельно с петрофизическими параметрами по тем же слоям под поляризационным микроскопом определялись геологические показатели: преобладающий размер обломочных зерен (d_z), содержание кластического (C_{kl}), глинистого (C_{gl}), карбонатного (C_k) материала и углистого вещества (C_{ugl}). Были установлены закономерности изменения физических свойств пород, обусловленные двумя группами факторов: генетической, связанной с d_z, C_{kl}, C_{gl}, C_k и C_{ugl} , и эпигенетической, обусловленной гравитационным уплотнением пород на глубине их максимального доинверсионного погружения (H_{max}) [2, 3].

Несмотря на масштабность данных исследований, нерешенными остались вопросы изучения параметров $V_{p,sk}$ и V_s . По этим параметрам имелись лишь фрагментарные сведения, относящиеся к отдельным участкам разведки [4].

Поэтому возникла необходимость в расширении имеющихся знаний по $V_{p,sk}$ и V_s для всего угольного бассейна. При этом вполне целесообразным является проведение исследований путем обобщения ранее полученных данных. К таковым относятся два вида результатов акустического каротажа (АК): V_p – по всему угольному бассейну; V_s – на одном из участков разведки. К ним также относятся данные лабораторного изучения физических свойств ($K_p, \delta_m, \delta_s, \delta_n$) и вещественного состава (d_z, C_{kl}, C_{gl}, C_k и C_{ugl}) пород по керновым пробам в комплексе с V_p .

Целью статьи является построение петроскорост-

ной модели Донбасса, отражающей влияние на скоростные характеристики угленосных пород основных геологических факторов генетической и эпигенетической группы.

Материалы и методы

Петроскоростной разрез является разновидностью петрофизического разреза, отличающейся от него специализированным набором петрофизических параметров.

Петрофизический разрез, как графическая конструкция, представляет собой семейство кривых изменения физических свойств однотипных пород в зависимости от величины H_{max} . Данные кривые отражают влияние на физические свойства пород двух групп факторов: генетической (при изменении типа породы и постоянной H_{max}) и эпигенетической (при постоянном типе породы и изменении H_{max}). Поэтому петрофизический разрез выбран для проводимых исследований.

На петроскоростном разрезе объединены результаты собственных исследований и литературные данные. В основу построения разреза положены собственные материалы, полученные в ходе комплексных петрофизических исследований Донбасса. К ним относятся данные, измеренные методом АК (V_p), определенные лабораторными методами (K_p, δ_m) и полученные под поляризационным микроскопом (d_z, C_{kl}, C_{gl}, C_k и C_{ugl}). Результаты этих исследований характеризуются высокой достоверностью, базирующейся на точной привязке керновых проб к геофизическим диаграммам, стандартизированном определении физических свойств, микроскопической идентификации типа пород, а также на большом количестве (24) изученных скважин и участков с широкой географией их распространения (рис. 1).

По этим материалам изначально строились кривые изменение V_p, K_p и δ_m в зависимости от H_{max} . Используя их, исследовалось изменение $V_{p,sk}$ и V_s в связи с H_{max} .

Определение параметра $V_{p,sk}$ выполнялось по уравнению Уайли:

$$\frac{1}{V_p} = \frac{1 - K_p}{V_{p,sk}} + \frac{K_p}{V_{p,f}}, \quad (1)$$

где V_p – скорость распространения продольных упругих волн в горной породе; $V_{p,sk}$ – то же в скелете горной породы; $V_{p,f}$ – то же во флюиде, заполняющем поры.

Параметр V_s получен отдельно для песчаников, алевролитов и аргиллитов по корреляционной зависимости вида:

$$V_s = aV_p + b. \quad (2)$$

Значения V_p и V_s измерялись на участке разведки «Бутовский-Глубокий» методом АК. Были получены значения коэффициентов « a » и « b » в уравнении (2). Для песчаника они соответственно составили 0.53 и -50, для алевролита 0.54 и -50, для аргиллита 0.59 и -150 [4]. Изменение V_p и V_s в данном случае обусловлено постдиагенетическим преобразованием от стадии 2Г до 7Т. Сделано допущение, что указанные коэффициенты применимы для всех стадий петроскоростного разреза.

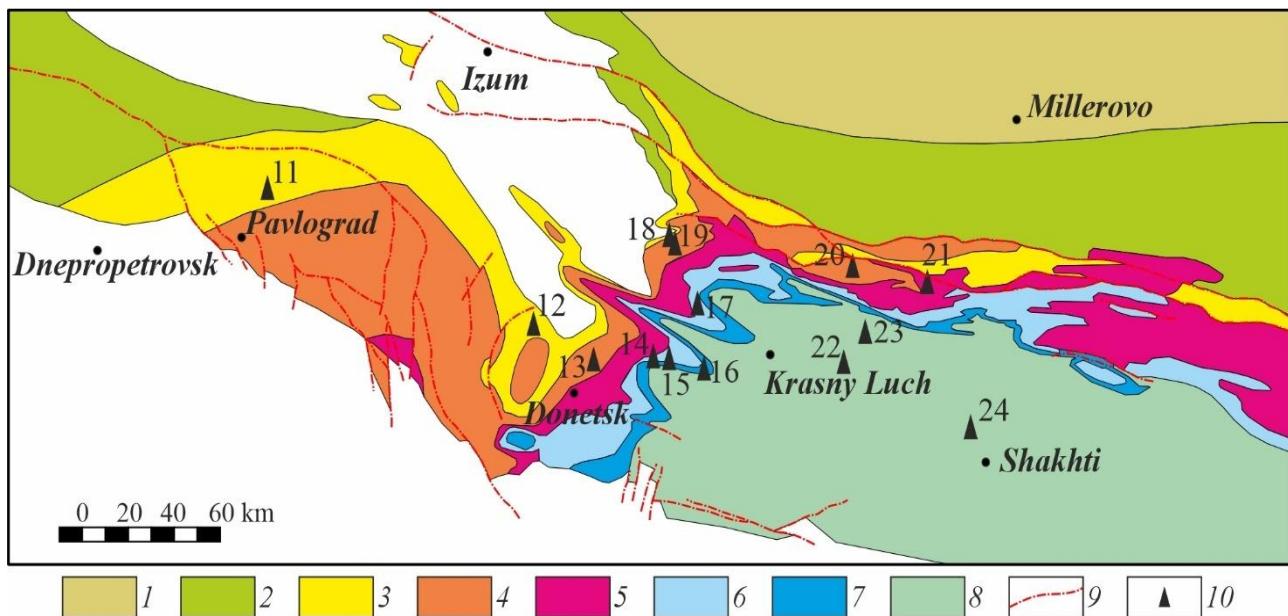


Рис. 1. Участки и параметрические скважины комплексных петрофизических исследований угленосных отложений Донбасса: 1–8 – зоны метаморфизма углей на поверхности палеозоя (по М. Л. Левенштейну, 1975; граница Б3 по В.В. Гречухину, 1977); 1 – блестящие бурые (Б3); 2 – переходные от бурых к каменным (ОБД); 3 – длиннопламенные (1Д); 4 – газовые (2Г-3Г); 5 – жирные (4Ж), коксовые (5К) и отощенно-спекающиеся (6ОС); 6 – тонкие (7Т); 7 – полуантрациты (8ПА-9ПА); 8 – антрациты (10А-14А); 9 – разрывные нарушения; 10 – параметрические скважины (скв.) и участки (уч.): 11 – уч. Свидовской; 12 – глубокая скв. Донбасса К-900; 13 – то же Щ-1027; 14 – то же С-1379; 15 – то же С-1378; 16 – уч. Донецкий Капитальный; 17 – уч. Боржиковский Северный; 18 – глубокая скв. Донбасса Ц-793; 19 – то же Ц-870; 20 – уч. Успенский Южный; 21 – уч. поля шахты Суходольская Восточная; 22 – уч. поля шахты им. XXIII съезда КПСС; 23 – уч. Володарский Рудник; 24 – уч. поля шахты Сулинская-2.

[**Fig. 1.** Sites and parametric wells for comprehensive petrophysical studies of the Donbas: (1–8) zones of coal metamorphism on the surface of the Paleozoic strata (according to M.L. Levenshtein, 1975; B3 boundary according to V.V. Grechukhin, 1977): (1) – lustrous lignites (B3); (2) – transitional between lignite and bituminous coal (OBD); (3) – long-flame coal (1D); (4) – gas coal (2G-3G); (5) – fat (4J), coking (5K) and lean caking (6OS) coals; (6) – lean coals (7T); (7) – semi-anthracites (8PA-9PA); (8) – anthracites (10A-14A); (9) – faults; (10) – parametric wells and drilling sites: (11) – Svidovskoi site; (12) – deep well of Donbass K-900; (13) – the same Shch-1027; (14) – the same S-1379; (15) – the same S-1378; (16) – Donetskiy Kapital'nyi site; (17) – Borzhikovskiy Severnyi site; (18) – deep well of Donbass TS-793; (19) – the same TS-870; (20) – Uspenskiy Yuzhnyi site; (21) – «Sukhodol'skaya Vostochnaya» mine field site; (22) – «im. XXIII s'ezda KPSS» mine field site; (23) – Volodarskiy Rudnik site; (24) – «Sulin'skaya-2» mine field site.]

Результаты

Петроскоростной разрез показан на рис. 2. Он состоит из кривых изменения физических свойств и специальных геологических показателей в зависимости от величины H_{max} . Физические свойства на нем представлены K_p , δ_m , V_p , $V_{p,sk}$ и V_s , геологические показатели – содержанием вторичного кварца (C_{vk}), трещиноватых и расколотых зерен (C_{tr}) и H_{max} . На разрезе также приведены стадии постдиагенетического преобразования пород и метаморфизма углей. В качестве показателя непрерывного изменения постдиагенетического преобразования выступает H_{max} .

Указанные стадии характеризуются определенными значениями петрофизических параметров (K_p , δ_s , δ_n , ρ_p , V_p) и показателей качества углей. Из них наиболее чувствительными к метаморфизму являются отражательная способность витринита в масле (R^o), ее анизотропия (AR), выход летучих веществ на сухую беззольную массу (V^{daf}) и толщина пластического слоя (Y). Стадийное изменение этих показателей в едином формате с петроскоростным разрезом представлено на рис. 3.

Разрез является сводным для бассейна, построенным по отдельным скважинам, расположенным в различных районах Донбасса (см. рис. 1). Частные разрезы сведены в единый по величине H_{max} . Для минимизации погрешности сведения за основу построения были приняты петрофизические разрезы наиболее глубоких угольных скважин Донбасса с максимальным количеством стадий постдиагенетического преобразования. Так, скважиной К-900 (глубина бурения 2945 м) охвачены стадии от 1Д до 7Т, скважиной Щ-1027 (2380 м) – от 3Г до 8ПА₁, скважиной С-1379 (2040 м) – от 8ПА₁ до 11А₂.

На разрезе представлены типы пород, определенные по петрографическим показателям (d_z , C_{kl} , C_{gl} , C_k , C_{ugl}): крупнозернистые, среднезернистые и мелкозернистые песчаники с глинистым цементом, алевролиты с глинистым цементом и аргиллиты. Их фациальная принадлежность не учитывается, поскольку в работе [5] показано, что физические свойства пород, в частности K_p , при одной и той же стадии постдиагенетического преобразования зависят от d_z , а не от фациальной принадлежности.

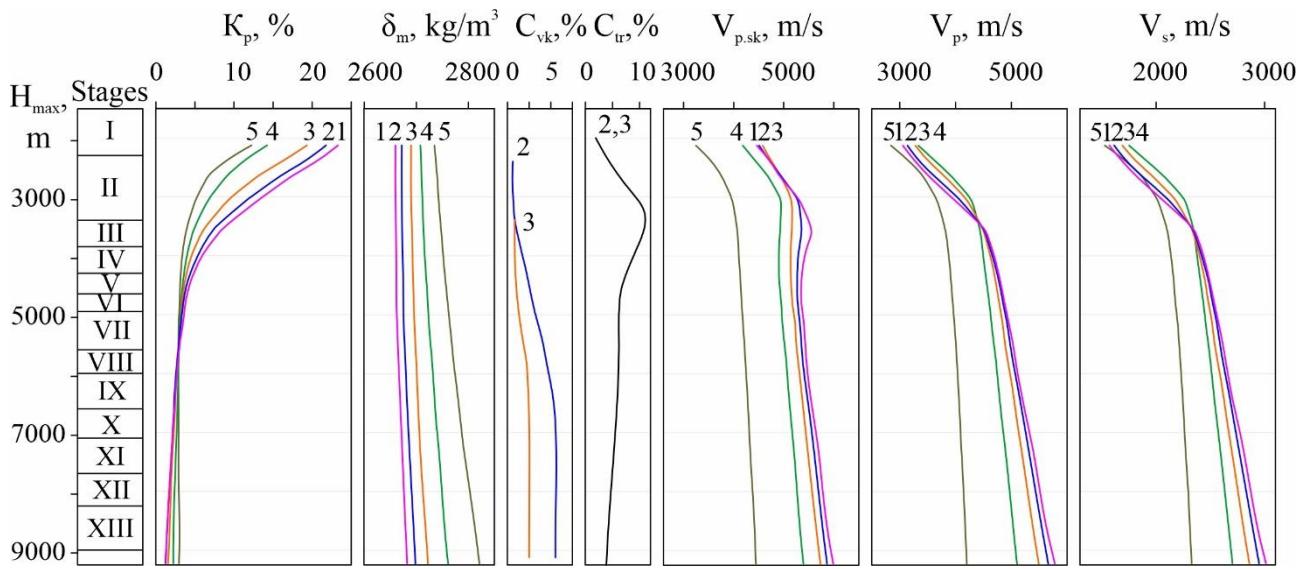


Рис. 2. Петроскоростной разрез угленосных отложений Донбасса: I-XIII – стадии постдиагенетического преобразования пород и метаморфизма углей: I – длиннопламенные 1Д; II – газовые 2Г; III – газовые 3Г; IV – жирные 4Ж; V – коксовые 5К; VI – отощено-спекающиеся 6ОС; VII – тощие 7Т; VIII – полуантрациты 8ПА; IX – полуантрациты 9ПА; X – антрациты А1; XI – антрациты А2; XII – антрациты А3; XIII – антрациты А4; I-5 – типы пород: 1 – песчаник крупнозернистый с глинистым цементом; 2 – то же среднезернистый; 3 – то же мелкозернистый; 4 – алевролит с глинистым цементом; 5 – аргиллит; H_{\max} – максимальная глубина доинверсионного погружения пород (по В. В. Гречухину, 1980); K_p – коэффициент общей пористости; δ_m – минералогическая плотность; C_{vk} – содержание вторичного кварца; C_{tr} – содержание трещиноватых и расколотых обломочных зерен; $V_{p,sk}$ – скорость распространения упругих продольных волн в скелете породы; V_p – то же в породе; V_s – скорость распространения упругих поперечных волн в породе. Породы без примесей углистого и карбонатного вещества (менее 5 % каждого).

[**Fig. 2.** Petroseismic cross-section of coal-bearing sediments of Donbass: I-XIII – Stages of post-diagenetic transformation of rocks and coal metamorphism: I – long-flame coal 1D; II – gas coal 2G; III – gas coal 3G; IV – fat coal 4J; V – coking coal 5K; VI – lean caking coals 6OS; VII – lean coals 7T; VIII – semi-anthracites 8PA; IX – semi-anthracites 9PA; X – anthracites A1; XI – anthracites A2; XII – anthracites A3; XIII – anthracites A4; (1-5) – rock types: (1) – coarse-grained sandstone with clay cement; (2) – same, medium-grained; (3) – same, fine-grained; (4) – siltstone with clay cement; (5) – argillite; H_{\max} – maximum depth of pre-inversion burial of rocks (according to V. V. Grechukhin, 1980); K_p – total porosity coefficient; δ_m – mineral density; C_{vk} – secondary quartz content; C_{tr} – content of fractured and crushed clastic grains; $V_{p,sk}$ – velocity of elastic longitudinal waves in the rock skeleton; V_p – same, in the rock; V_s – velocity of elastic shear waves in the rock. Rocks contain less than 5 % of both carbonaceous and carbonate material (i.e., essentially free of these impurities).]

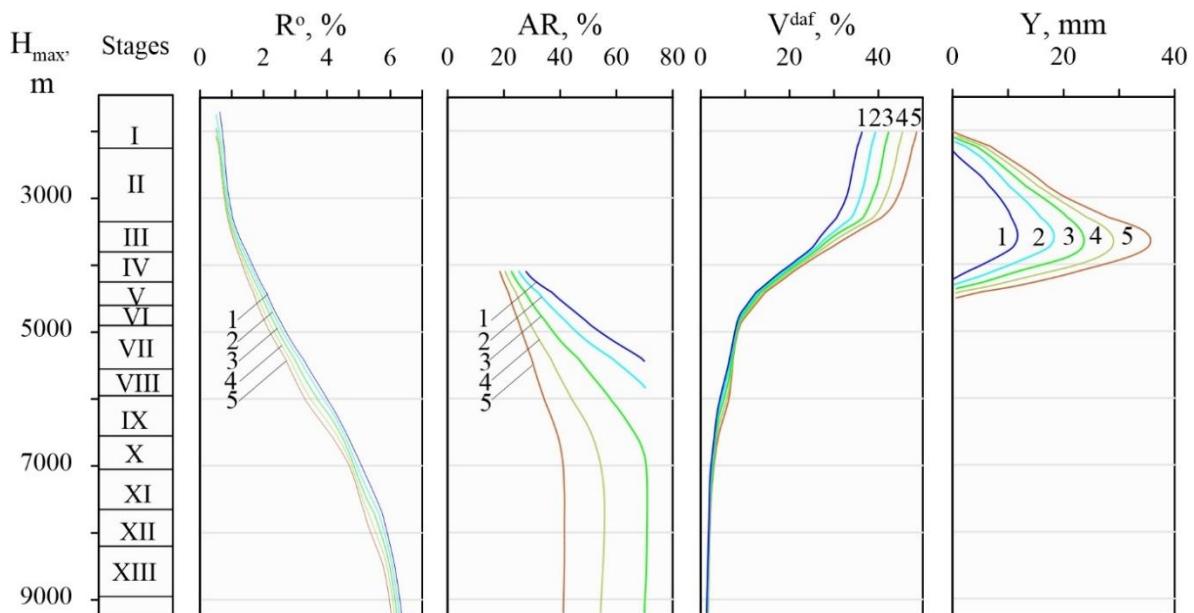


Рис. 3. Стадийное изменение показателей метаморфизма клареновых углей Донбасса (по данным [6]): R^o – отражательная способность витринита в масле; AR – анизотропия отражательной способности витринита; V^{daf} – выход летучих веществ на сухую беззольную массу; Y – толщина пластического слоя, характеризующая коксемость углей; шифр кривых – тип углей по восстановленности: 1 – особо маловосстановленный; 2 – маловосстановленный; 3 – промежуточный; 4 – восстановленный; 5 – весьма восстановленный; обозначения H_{\max} и стадий – см. на рис. 2.

[Fig. 3. Stage-related variation of metamorphism indices of clarain coals from the Donbas (according to [6]): R^o – vitrinite reflectance in oil; AR – vitrinite reflectance anisotropy; V_{daf} – volatile matter yield on a dry, ash-free basis; Y – thickness of the plastic layer, characterizing the coking properties of coals; legend of curves – coal type by degree of reduction: (1) – very slightly reduced; (2) – slightly reduced; (3) – intermediate; (4) – reduced; (5) – strongly reduced; designations H_{max} and stages – see Fig. 2.]

Влияние вариаций d_z , C_{kl} и C_{gl} на физические свойства пород исключено путем использования значений физических свойств пород, соответствующих средине классификационного диапазона изменения показателей состава. Для этого использовались вспомогательные графики изменения петрофизических параметров в зависимости от показателей состава, построенные

для интервалов разреза ограниченной (не более 100–150 м) мощности (рис. 4). При этом C_{kl} аргиллитов характеризуется величиной 12 %, d_z алевролитов 0.08 мм, песчаников мелкозернистых 0.18 мм, среднезернистых 0.38 мм и крупнозернистых 0.75 мм. Влияние C_k и C_{ugl} учтено путем отбора пород с величиной данных показателей не более 5 % каждого.

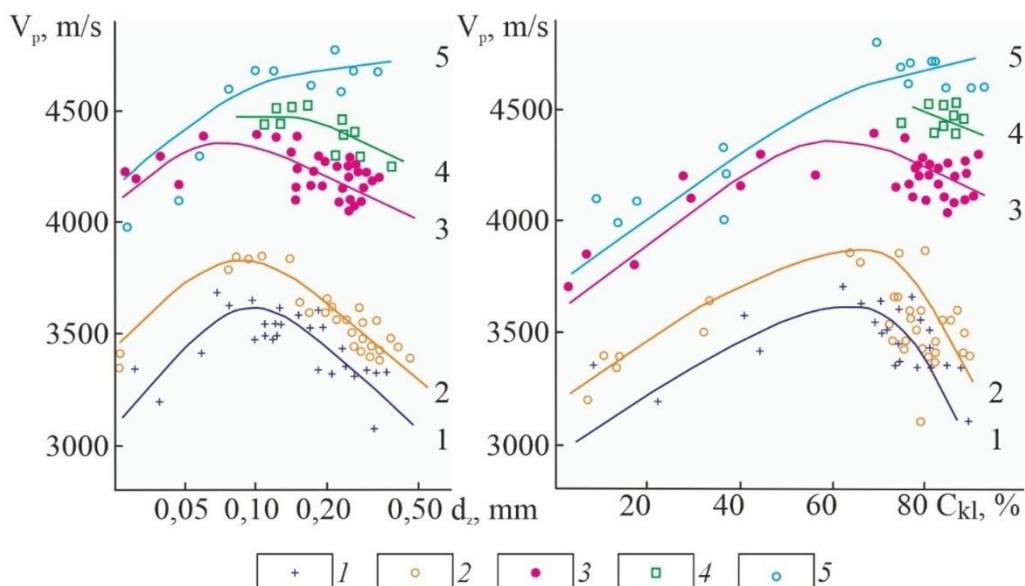


Рис. 4. Вспомогательные графики для построения петроскоростного разреза: V_p – скорость распространения упругих продольных волн, d_z – преобладающий размер обломочных зерен, C_{kl} – содержание кластического материала; шифр кривых – стадии постдиагенетического преобразования пород и метаморфизма углей: 1 – средина 1Д; 2 – конец 1Д; 3 – начало 2Г; 4 – средина 2Г; 5 – конец 2Г.

[Fig. 4. Auxiliary graphs for constructing a petro-velocity cross-section: V_p – velocity of elastic longitudinal (P-) waves; d_z – predominant grain size of clastic particles; C_{kl} – content of clastic material; legend of curves – stages of post-diagenetic rock transformation and coal metamorphism: (1) – middle of stage 1D; (2) – end of stage 1D; (3) – beginning of stage 2G; (4) – middle of stage 2G; (5) – end of stage 2G.]

Характеристика петроскоростных параметров

Параметр K_p на петроскоростном разрезе отражает характер и масштаб уплотнения пород в ходе их постдиагенетического преобразования. В верхней части разреза максимальным K_p обладают наиболее крупнозернистые породы, в нижней части разреза – наиболее мелкозернистые. На 1Д стадии величина K_p песчаников крупнозернистых и мелкозернистых составляет соответственно 20.8 и 16.6 %, алевролитов – 11.0 %, аргиллитов – 8.3 %. На 14A₅ стадии K_p этих типов пород принимает следующие значения: 1.2; 1.5; 2.2 и 3.0 %.

На границе катагенеза и метагенеза (стадий 7Т и 8ПА₁) величина K_p рассматриваемых типов пород становится одинаковой и составляет 3 %. В этой части разреза происходит инверсия пород по параметру K_p . Ее образование обусловлено большим градиентом параметра K_p по разрезу, присущим более крупнозернистым породам по сравнению с мелкозернистыми разностями.

Параметр δ_m характеризуется незначительным увеличением вниз по разрезу и тем, что максимальными значениями обладают наиболее мелкозернистые породы по сравнению с крупнозернистыми разностями. В верхней части разреза (стадия 1Д) значение δ_m песчаника крупнозернистого, песчаника мелкозернистого, алевролита и аргиллита составляет соответственно 2660, 2691, 2709 и 2722 кг/м³. В нижней части разреза (стадия 14A₅) величина δ_m указанных типов пород соответственно равна 2680, 2720, 2760 и 2820 кг/м³.

Параметр V_p от стадии 1Д до 14A₅ закономерно увеличивается от 3100–3550 м/с до 4200–5500 м/с. Так же, как и параметр K_p , величина V_p изменяется монотонно.

При этом параметр V_p аргиллитов увеличивается от 2840 до 4200 м/с. Преимущественно (на 76 %) это изменение (от 2840 до 3880 м/с) происходит в верхней части разреза (от стадии 1Д до 4Ж) на фоне уменьшения K_p . Внизу разреза (от стадии 8ПА₁ до 14A₅) V_p

незначительно увеличивается (от 4000 до 4200 м/с) при постоянном значении K_p , равном 3 %. Изменение V_p при неизменном K_p является отличительной особенностью аргиллита.

Соотношение обломочных пород по V_p не остается постоянным и наиболее сложным образом изменяется на стадиях от 2Г до 3Г. Для уточнения особенностей данного изменения использовались вспомогательные графики зависимости V_p от d_z и C_{kl} (см. рис. 4). По ним установлено, что на 1Д стадии типы пород в порядке роста V_p располагаются в следующей последовательности: аргиллит, песчаник крупнозернистый, песчаник среднезернистый, песчаник мелкозернистый, алевролит. Начиная с 4Ж стадии и больше, породы перестраиваются в новый ряд: аргиллит, алевролит, песчаник мелкозернистый, песчаник среднезернистый, песчаник крупнозернистый. При этом максимум параметра V_p от алевролита вниз по разрезу постепенно смещается к более крупнозернистым разностям песчаника. Его

смещение происходит на небольшом интервале разреза, представляющем собой область инверсии пород по рассматриваемому параметру.

На рис. 5 изменение V_p и K_p отражено при помощи изолиний в прямоугольной системе координат показателей d_z и H_{max} , отражающих соответственно влияния генетических и эпигенетических факторов. Коэффициент корреляции рассчитывался как косинус угла между изолиниями двух физических параметров. По его значению не менее 0,9 выделяются участки графика, на которых лишь один фактор является определяющим изменение V_p . По тесной корреляции V_p и K_p установлено, что в области инверсии и выше по разрезу изменение параметр V_p полностью зависит только от K_p . При этом инверсия происходит в диапазоне изменения K_p от 5 до 10 %. На шкале стадий постдиагенетического преобразования пород она занимает вполне определенное место, соответствующее границе 2Г и 3Г стадий.

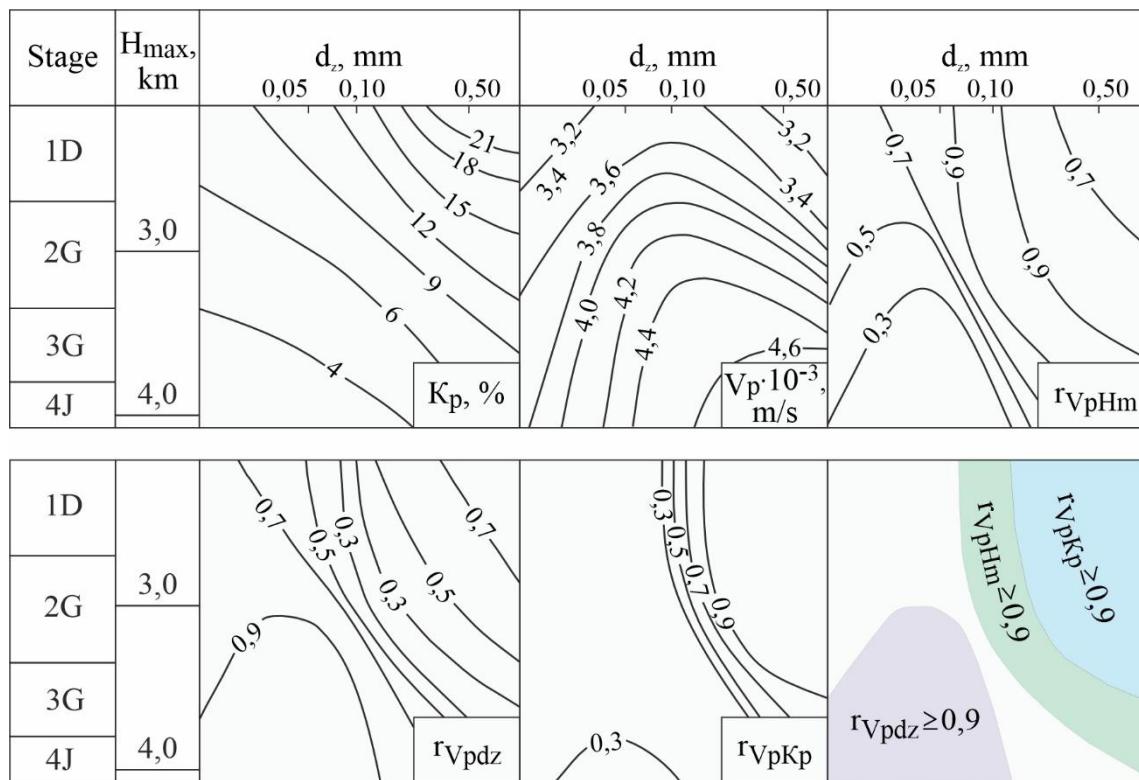


Рис. 5. Изменение K_p , V_p и коэффициентов корреляции в прямоугольной системе координат генетического (d_z) и эпигенетического (H_{max}) факторов: H_{max} – максимальная глубина доинверсионного погружения пород; d_z – преобладающий размер обломочных зерен; K_p – коэффициент общей пористости; $rVpdz$ – коэффициент корреляции V_p с d_z ; $rVpKp$ – то же с K_p ; $rVpHm$ – то же с H_{max} ; содержание примесей карбонатного и углистого вещества не превышает 5 % каждого.

[**Fig. 5.** Variation of K_p , V_p , and correlation coefficients in a rectangular coordinate system of genetic (d_z) and epigenetic (H_{max}) factors: H_{max} – maximum depth of pre-inversion burial of rocks; d_z – predominant grain size of clastic particles; K_p – total porosity coefficient; $rVpdz$ – correlation coefficient between V_p and d_z ; $rVpKp$ – same, between V_p and K_p ; $rVpHm$ – same, between V_p and H_{max} ; the content of carbonate and carbonaceous impurities does not exceed 5% each.]

Параметр $V_{p,sk}$ характеризуется общим увеличением вниз по петроскоростному разрезу и такими особенностями, как нивелирование песчаников на стадиях от 1Д до средины 2Г и образование локального максимума на границе стадий 2Г и 3Г (см. рис. 2).

По определению параметр $V_{p,sk}$ зависит не от изменения K_p , а от структурно-минералогических особенностей скелета породы. При этом уплотнение пород рассматривается как результат сближения обломочных зерен скелета под давлением вышележащих отложений.

Сближения зерен происходит двумя основными способами: первый – свободное или механическое перемещение зерен, второй – вдавливание одного зерна в другое.

Первый способ распространен на стадиях от 1Д до 3Г и характеризуется образованием непрочных контактов зерен точечного типа. Их количество в единице объема породы уменьшается по мере увеличения d_z . Поэтому на указанных стадиях с увеличением d_z параметр $V_{p,sk}$ практически не изменяется либо испытывает незначительное уменьшение (см. рис. 2).

Второй способ развит на последующих стадиях и обусловлен ростом палеодавления вышележащих пород. При этом уменьшение количества контактов зерен в единице объема пород обусловливает увеличение давления на контакте зерен и, как следствие, их деформацию и увеличение протяженности контактов. Поэтому на стадиях более 3Г в результате увеличения протяженности контактов с увеличением d_z происходит увеличение $V_{p,sk}$.

Удельная протяженность контактов относительно периметра зерна от стадии 1Д до 15A₅ увеличивается от 0.36 до 0.90 отн. ед. [7]. Судя по этому изменению, протяженность контактов становится большей в три раза.

Таким образом, увеличение показателя d_z приводит как к некоторому уменьшению, так и увеличению $V_{p,sk}$. Первый случай обусловлен уменьшением количества контактов в единице объема породы, а второй – увеличением их протяженности и прочности.

Параметр $V_{p,sk}$, наряду с K_p , принимает участие в формировании инверсии пород по V_p . Как показано на рис. 4, выше области инверсии параметр V_p с увеличением d_z обломочных пород уменьшается (кривые 1, 2, 3, 4), ниже данной области – увеличивается (кривая 5). В первом случае параметр $V_{p,sk}$ практически не изменяется и тем самым не препятствует уменьшению V_p за счет увеличения K_p . Ниже области инверсии увеличение параметра K_p также влияет на уменьшения параметра V_p , однако это влияние значительно меньше по сравнению с его увеличением, обусловленным ростом $V_{p,sk}$.

Следовательно, смена характера зависимости $V_{p,sk}$ от d_z при переходе от стадии 2Г к 3Г является причиной образования инверсии по V_p .

Образование локального максимума $V_{p,sk}$ на кривых петроскоростного разреза на 3Г стадии тесно связано с изменением показателей C_{vk} и C_{tr} песчаников. Показатель C_{tr} достигает максимума значения, равного 10 %, на стадии 3Г и быстро уменьшается до 2 % на меньших и больших стадиях. Причины уменьшения C_{tr} разные: на стадиях от 1Д до 3Г – незначительное увеличение палеодавления, не способствующее разрушению зерен; на стадиях от 3Г до 14A₅ – развитие вторичного кварцевого цемента, заливающего деформированные зерна. С уменьшением C_{tr} во втором случае согласно увеличивается C_{vk} [8].

Субпараллельный ход кривых $V_{p,sk}$ и C_{tr} в интервале стадий от 1Д до 6ОС означает, что увеличение показателя C_{tr} приводит не к предполагаемому уменьшению, а к фактическому увеличению $V_{p,sk}$. Такое изменение $V_{p,sk}$ объясняется ростом протяженности контактов

целых зерен за счет перераспределения к ним палеодавления от разрушенных зерен.

Параметр $V_{p,sk}$ аргиллита монотонно растет и достигает максимума в конце разреза. Преимущественная часть (около 70 %) данного изменения происходит в верхней части разреза (от стадии 1Д до 4Ж) параллельно с уменьшением K_p . В нижней части разреза (от стадии 8ПА₁ до 14A₅) параметр $V_{p,sk}$ увеличивается при постоянном значении K_p , достигшем своего минимума.

Увеличение $V_{p,sk}$ аргиллитов обусловлено структурно-минералогическим преобразованием глинистого материала. Его постдиагенетическая гидрослюдизация, дегидратация и уменьшение содержания обменных катионов приводят к уменьшению содержания связанный воды, что способствует сближению глинистых частиц. Палеодавление их переориентирует и сближает, упрочняя структуру породы.

По данным [9] на стадиях от 0БД до 3Г распространены монтмориллонит, смешанослойные образования, каолинит, гидрослюдя, хлорит. На стадиях от 4Ж до 9ПА₂ из этого перечня остаются каолинит, гидрослюдя и хлорит, а на стадиях от 10A₁ до 14A₅ – лишь гидрослюдя и хлорит. При этом гидрослюдизация монтмориллонита и каолинита приводит к увеличению δ_m , соответственно, от 1800 кг/м³ и 2570 кг/м³ до 2700±50 кг/м³. Параметр δ_m гидрослюды от последнего числа увеличивается до 2815±15 кг/м³.

Приводимые данные по δ_m глинистых минералов подтверждаются ростом δ_m аргиллитов от 2730 до 2820 кг/м³ на петроскоростном разрезе в интервале стадий 0БД до 14A₅ (см. рис. 2).

Следовательно, увеличение параметра $V_{p,sk}$ аргиллитов обусловлено влиянием двух основных факторов: первого – упрочнением контактов глинистых частиц в результате потери связанный воды и сближения частиц, второго – увеличением их δ_m за счет гидрослюдизации монтмориллонита, каолинита, смешанослойных минералов и преобразования самой гидрослюды.

Параметр V_s получен путем корреляции с величиной V_p . Поэтому кривые изменения данных параметров в зависимости от H_{max} (см. рис. 2) качественно одинаковые. Параметр V_s также характеризуется более интенсивным увеличением вниз по петроскоростному разрезу на начальных стадиях катагенеза и формированием инверсии на границе стадий 2Г и 3Г. В количественном отношении от стадии 0БД до 14A₅ параметр V_s увеличивается от 1526–1750 м/с от 2328 до 3077 м/с. В верхней части разреза максимальным значением характеризуется алевролит, на стадиях более 3Г – песчаник крупнозернистый. Минимум V_s на всех стадиях принадлежит аргиллиту.

Обсуждение и выводы

Ранее, учитывая обратимые изменения параметра V_p , связанные с современной глубиной залегания пород, нами установлена инверсия обломочных пород по данному параметру на границе стадий 2Г и 3Г. Ее образование объяснялось различием пород по градиенту V_p (скорости изменения параметра с глубиной):

породы со сравнительно меньшим значением параметра V_p и большим градиентом V_p ниже по разрезу опережали другие типы пород и становились наиболее высокоскоростными образованиями [10, 11].

Сама инверсия заключается в том, что с увеличением d_z обломочных пород выше области инверсии V_p уменьшается, ниже данной области – увеличивается. При этом параметр K_p в обоих случаях увеличивается и никак не объясняет увеличение V_p .

Увеличения V_p с ростом K_p становится понятным при изучении изменения $V_{p,sk}$. Выше области инверсии его практическое постоянное значение не препятствует уменьшению V_p , связанному с увеличением K_p . Ниже данной области параметр $V_{p,sk}$ увеличивается и, несмотря на некоторое увеличение K_p , влечет за собой рост V_p . Поэтому инверсия обломочных пород по V_p представляет собой следствие увеличения $V_{p,sk}$ с ростом d_z на стадиях 2Г и больше.

Выявлено особое поведение V_p в области инверсии и выше по разрезу, заключающееся в образовании тесной связи V_p с K_p не зависимо от генетической или эпигенетической причины их изменения. Данный вывод является обоснованием для определения K_p по данным V_p на стадиях от 1Д до 2Г, не прибегая к разделению обломочных пород на типы.

Скоростные параметры аргиллита определяются не только K_p , но и существенным преобразованиям структуры и состава скелета породы. Увеличение скоростных характеристик происходит в результате сближения глинистых частиц, упрочнения их контактов и увеличения плотности. Поэтому в нижней половине разреза увеличение скоростных характеристик происходит на фоне роста δ_m при постоянной величине K_p .

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о закономерном изменении кривых V_p , $V_{p,sk}$ и V_s на петроскоростном разрезе. Данное изменение обусловлено постдиагенетическим уменьшением пористости, упрочнением контактов между обломочными зернами и глинистыми частицами, увеличением плотности глинистых минералов, образованием вторичного кварца и локальным проявлением трещиноватости обломочных зерен. Область использования петроскоростного разреза определяется распространением зон постдиагенетического изменения пород и углей от стадии 0БД до 14А₅ и соответствует границам угольного бассейна.

Количественные петроскоростные характеристики позволяют строить физико-геологические модели угленосных разрезов с учетом типа пород и величины постдиагенетического преобразования, что представляет собой петрофизическое обеспечение геофизических исследований методами акустического каротажа и сейсморазведки на территории Донбасса [1, 12].

Заключение

1. Построен петроскоростной разрез для всего Донбасса, отражающий характер и величину изменения скоростных параметров гранулометрического ряда пород по всем стадиям постдиагенетического

преобразования.

2. Конкретизированы причины постдиагенетического увеличения скоростных параметров в виде уменьшения пористости и упрочнения скелета пород в связи со сближением обломочных зерен и глинистых частиц, увеличением протяженности и прочности их контактов, ростом содержания вторичного кварца и увеличением минералогической плотности глинистых минералов.

3. По весьма тесной корреляции V_p и K_p определено постоянное место инверсии обломочных пород по V_p на петроскоростном разрезе, располагающейся на границе стадий 2Г и 3Г.

4. Установлено, что рост размера зерен обломочных пород выше области инверсии уменьшает количество контактов зерен, а ниже данной области увеличивает протяженности этих контактов, в результате чего в первом случае скоростные параметры уменьшаются, а во втором случае они увеличиваются.

5. Образование локального максимума $V_{p,sk}$ на 3Г стадии объясняется увеличением протяженности контактов зерен в результате перераспределения палеодавления от разрушенных зерен к целым.

6. Показано, что постдиагенетическое увеличение параметра $V_{p,sk}$ аргиллитов обусловлено уменьшением их пористости, упрочнением контактов глинистых частиц и увеличением их плотности.

7. Информация, содержащаяся в петроскоростном разрезе, позволяет решать вопросы петрофизического обеспечения сейсморазведочных работ и акустического каротажа на шахтных полях всего угольного бассейна.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Л. А., Туманов В. В. Модель скоростного разреза аномального скопления метана по петрофизическим данным // *Горное эхо*. 2023. № 3(92). С. 116–128. DOI: 10.7242/echo.2023.3.17.
2. Гречухин В. В. Изучение угленосных формаций геофизическими методами. М.: Недра, 1980. 360 с.
3. Гречухин В. В. Петрофизика угленосных формаций. М.: Недра, 1990. 472 с.
4. Хохлов М. Т., Харитонов О. М., Трифонов П. Г., Козельский И. Т., Байсарович М. Н. Многоволновые сейсмические исследования угольных месторождений Донбасса. К: Наук. думка, 1990. 132 с.
5. Иванов Г. А. Методика фациально-тектонического анализа угленосных отложений и применение ее на практике геологоразведочных работ // *Труды лаб. Геол. угля АН СССР*. 1956. Вып. 5. С. 127–152.
6. Левенштейн М. Л., Спирин О. И. Комплект карт метаморфизма углей Донецкого бассейна. К., ЦТЭ, 1991. 104 с.
7. Логвиненко Н. В., Орлова Л. В. Образование и изменение осадочных пород на континенте и в океане. Л.: Недра, 1978. 237 с.
8. 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.

9. Карпова Г. В. Глинистые минералы и их эволюция в терригенных отложениях. М.: Недра. 1972. 172 с.
10. 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. 2003. Вип. 63. С. 127–133.
11. 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. 2004. С. 169–175.
12. Иванов Л. А. Скоростные параметры аномального скопления метана, определенные по петрофизическим данным // Труды РАНИМИ. 2023. № 22 (37). С. 50–60. DOI: 10.24412/1996-885X-2023-2237-50-60.

UDC: 553.94:550.85

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/3/41-50>

Received: 27.05.2025

Accepted: 30.08.2025

Published online: 30.09.2025

Petro-velocity crossection of the Donetsk coal basin

©2024 L. A. Ivanov, V. V. Tumanov, I. Yu. Nikolaev[✉]

Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Chelyuskintsev str., 291, Donetsk, 263004

Abstract

Introduction: recently, seismic exploration has gained increasing importance for the detection of hazardous methane accumulations in coal deposits. Reliable identification of such accumulations requires sufficiently accurate knowledge of the propagation velocity of elastic longitudinal waves in the rock (V_p) and its skeleton ($V_{p,sk}$), and elastic transverse waves (V_s). Despite extensive research conducted in previous decades, the parameters $V_{p,sk}$ and V_s remain largely insufficiently studied. Therefore, to provide a petrophysical basis for seismic exploration, a comprehensive study of petrophysical velocity characteristics and their variation across the composite stratigraphic section of the basin has been carried out.

Methodology: the composite velocity section was constructed by stacking partial sections according to the maximum pre-inversion burial depth of rocks (H_{max}). The parameter H_{max} was determined based on coal quality indices; V_p was obtained from acoustic logging; $V_{p,sk}$ was calculated using the Wyllie equation; V_s was derived from correlation with V_p . To substantiate the observed regularities in the variation of petrophysical velocity parameters, data on the structural and mineralogical features of clastic and argillaceous rocks were employed.

Results and discussion: a petro-velocity crossection of the coal basin was developed in the form of a family of curves describing the variation in total porosity, mineral density, secondary quartz content, fractured and cleaved grains, as well as V_p , $V_{p,sk}$, and V_s as functions of H_{max} . The causes of velocity inversion in clastic rocks and the increase in velocity parameters in argillaceous rocks under constant porosity conditions were identified.

Conclusion: a petro-velocity crossection has been constructed for all granulometric varieties and post-diagenetic transformation stages of coal-bearing deposits in the Donbas region. The factors responsible for post-diagenetic increases in velocity parameters were clarified, namely porosity reduction and strengthening of the rock framework. It was established that velocity inversion at the boundary between stages 2G and 3G is caused by an increase in $V_{p,sk}$, resulting from the extension of clastic grain contacts below this boundary. It was also demonstrated that the post-diagenetic increase in $V_{p,sk}$ of argillites at constant porosity is due to the strengthening of contacts and an increase in the mineral density of clay particles.

Keywords: coal basin, petro-velocity crossection, porosity and rock skeleton, grain size and contacts, post-diagenetic transformation, inversion, anomalous methane accumulations.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Ivan Yu. Nikolaev, e-mail: nikolaev@yandex.ru

Funding: The work was carried out within the framework of scientific theme FRSR-2023-0007 «Development of geological and geophysical model of formation of anomalous accumulations of methane at coal mines in zones of dynamic influence of faults».

For citations: Ivanov L. A., Tumanov V. V., Nikolaev I. Yu. Petro-velocity crossection of the Donetsk coal basin // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 3, pp. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/3/41-50>

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Ivanov L. A., Tumanov V. V. Model' skorostnogo razreza anomal'nogo skopleniya metana po petrofizicheskim dannym [Model of velocity section of anomalous methane accumulation based on petrophysical data]. *Gornoe ekho – Mining echo*, 2023, no. 3 (92), pp. 116–128 (In Russ).
2. Grechuhin V. V. *Izuchenie uglenosnykh formatsii geofizicheskimi metodami* [Study of coal-bearing formations by geophysical methods]. Moscow, Nedra publ., 1980, 360 p. (In Russ.).
3. Grechuhin V. V. *Petrofizika uglenosnyh formacij* [Petrophysics of coal-bearing formations]. Moscow, Nedra publ., 1990, 472 p. (In Russ.).
4. Khokhlov M. T., Kharitonov O. M., Trifonov P. G., Kozel'skii I. T., Baisarovich M. N. *Mnogovolnovye seismicheskie issledovaniya ugol'nykh mestorozhdenii Donbassa* [Multi-wave seismic studies of coal deposits in Donbass]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1990, 132 p. (In Russ.).
5. Ivanov G. A. Metodika fatsial'no-tektonicheskogo analiza uglenosnykh otlozhenii i primenie ee na praktike geologorazvedochnykh rabot [Methodology of facies-tectonic analysis of coal-bearing sediments and its application in geological exploration practice]. *Trudy lab. Geol. uglya AN SSSR – Proceedings of the Laboratory of Coal Geology, USSR Academy of Sciences*, 1956, no. 5, pp. 127–152 (In Russ.).
6. Levenshtein M. L., Spirina O. I. *Komplekt kart metamorfizma ugley Donetskogo basseina* [Set of maps of coal metamorphism in the Donetsk Basin]. Kiev, TsSTE publ., 1991, 104 p. (In Russ.).
7. Logvinenko N. V., Orlova L. V. *Obrazovanie i izmenenie osadochnykh porod na kontinente i v okeane* [Formation and change of sedimentary rocks on the continent and in the ocean]. Leninograd, Nedra publ., 1978, 237 p. (In Russ.).
8. Grechukhin V. V., Ivanov L. A., Voevoda B. I., Daragan V. N., Savchenko A. V. Granulometricheskie i petrofizicheskie zakonomernosti uglenosnykh porod Donetskogo basseina [Granulometric and petrophysical regularities of coal-bearing rocks of the Donetsk Basin]. *Sovetskaya geologiya – Soviet Geology*, 1990, no. 1, pp. 67–76 (In Russ.).
9. Karpova G. V. *Glinistye mineraly i ikh evolyutsiya v terrigennykh otlozheniyakh* [Clay minerals and their evolution in terrigenous sediments]. Moscow, Nedra publ., 1972, 172 p. (In Russ.).
10. Ivanov L. A., Voevoda B. I. Sovremennaya glubina kak faktor izmeneniya skorosti rasprostraneniya uprugikh prodol'nykh voln Vp uglenosnykh porod Donbassa [Modern depth as a factor of change in the velocity of elastic longitudinal wave propagation Vp of coal-bearing rocks of Donbass]. *Naukovi pratsi DonNTU: seriya gornichо-geologichna – Scientific papers of DonNTU Series: «The Mining and Geology»*, 2003, no. 63, pp. 127–133 (In Russ.).
11. Ivanov L. A., Voevoda B. I. Inversiya uglenosnykh porod Donbassa v katageneze po znacheniyu skorosti rasprostraneniya uprugikh prodol'nykh voln [Inversion of coal-bearing rocks of Donbass in catogenesis by the value of elastic longitudinal wave propagation velocity]. *Naukovi pratsi DonNTU: seriya gornichо-geologichna – Scientific papers of DonNTU Series: «The Mining and Geology»*, 2004, no. 72, pp. 169–175 (In Russ.).
12. Ivanov L. A. Skorostnye parametry anomal'nogo skopleniya metana, opredelennye po petrofizicheskim dannym [Velocity parameters of anomalous methane accumulation determined by petrophysical data]. *Trudy RANIMI – Transactions of RANIMI*, 2023, no. 22 (37), pp. 50–60 (In Russ.). DOI: 10.24412/1996-885X-2023-2237-50-60.

Иванов Леонид Анатольевич, к.г.-м.н., доцент, в.н.с. ФГБНУ РАНИМИ, Донецк, Российская Федерация;
e-mail: ivanov.donetsk@mail.ru;
ORCID <https://orcid.org/0009-0006-8341-8235>

Николаев Иван Юрьевич, к.г.н., в.н.с. ФГБНУ РАНИМИ, Донецк, Российская Федерация;
e-mail: nikolaevvoegi@yandex.ru;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2208-0032>

Туманов Виктор Владимирович, ст.н.с. ФГБНУ РАНИМИ, Донецк, Российская Федерация; e-mail: tum.v@yandex.ru;
ORCID <http://orcid.org/0009-0004-1521-4818>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Leonid A. Ivanov, PhD in Geol.-Min., Associate professor, Leading Researcher of the RANIMI, Donetsk, Russian Federation; e-mail: ivanov.donetsk@mail.ru;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8341-8235>

Ivan Yu. Nikolaev, PhD in Geol., Leading Researcher of the RANIMI, Donetsk, Russian Federation;
e-mail: nikolaevvoegi@yandex.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2208-0032>

Victor V. Tumanov, Senior Researcher of the RANIMI, Donetsk, Russian Federation; e-mail: tum.v@yandex.ru;
ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-1521-4818>

All authors have read and approved the final manuscript.