

**ПРИМЕНЕНИЕ AVO-АНАЛИЗА И КОНСТАНТ ЛАМЕ
ДЛЯ ПРОГНОЗА КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ
МЕЖСОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА**

Переволоцкая Янина Александровна, геофизик 2 категории, РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», БелНИПИнефть, 246003, Беларусь, г. Гомель, ул. Книжная 15а, e-mail: perevolotskaia@mail.ru

В сложных глубинных сейсмогеологических условиях Припятского прогиба актуальны исследования и выявление новых залежей на разработанных месторождениях, что, в свою очередь, обуславливает выработку оптимизационных подходов ко всем стадиям проведения сейсморазведочных работ. Получение в ходе проведения площадных сейсмических съёмок большого объёма равномерно распределённой сейсмической информации позволяет не только детализировать структурные планы целевых горизонтов, но и в совокупности с данными скважинных исследований осуществлять прогноз фильтрационно-ёмкостных свойств в межскважинном пространстве. Прогноз свойств в межскважинном пространстве на площадях Припятского прогиба осуществляется практически всеми модулями динамической интерпретации сейсмических данных, однако следует отметить особый интерес к методам сейсмической инверсии как к методам, способным получать дополнительную детальную информацию о свойствах среды. Одной из стандартных процедур при проведении динамического анализа сейсмических данных является AVO-анализ для определения типа литологии и вида насыщенности на качественном уровне. Для более точного прогноза свойств пород в исследовании в ходе выполнения инверсионных преобразований рассчитаны константы Ламе, позволяющие, в свою очередь, расширить возможности распознавания литологии и предположительного насыщения коллекторов. Комплексная интерпретация результатов атрибутного AVO-анализа и атрибутов, характеризующих константы Ламе, в сложных геологических условиях площадей Припятского прогиба позволяет с большей точностью выявлять и картировать перспективные зоны, связанные с углеводородонасыщением.

Ключевые слова: Припятский прогиб, прогноз коллекторских свойств, динамический анализ, AVO-анализ, константы Ламе

**APPLICATION OF AVO-ANALYSIS AND LAME CONSTANTS
FOR FORECASTING CARBONATE RESERVOIRS
OF INTER-SALT DEPOSITS OF THE PRIPYAT TROUGH**

Perevolockaya Yanina A., geophysicist of the 2nd category, RUE "Production Association "Belorusneft", BelNIPIneft', 15a Knizhnaya St., Gomel, 246003, Belarus, e-mail: perevolotskaia@mail.ru

In the complex deep seismogeological conditions of the Pripyat trough, the need for research and identification of new deposits in the developed fields is relevant, which in turn determines the development of optimization approaches to all stages of seismic exploration. Obtaining a large volume of uniformly distributed seismic information in the course of areal seismic surveys allows not only to detail the structural plans of target horizons, but also, in conjunction with data from well studies, to forecast the reservoir properties in the interwell space. Prediction of properties in the interwell space in the areas of the Pripyat trough is carried out by almost all modules for the dynamic interpretation of seismic data, however, special interest in seismic inversion methods should be noted, as methods capable of obtaining additional detailed information about the properties of the geological environment. One of the standard procedures for dynamic analysis of seismic data is AVO analysis to determine the type of lithology and type of saturation at a qualitative level. For a more accurate prediction of rock properties, the Lamé constants were calculated in the course of inversion transformations, which in turn allow us to expand the possibilities of recognizing the lithology and estimated reservoir saturation. A comprehensive interpretation of the results of attribute AVO analysis and attributes that characterize the Lamé constants in complex geological conditions of the Pripyat trough areas makes it possible to identify and map promising zones associated with hydrocarbon saturation with greater accuracy.

Keywords: Pripyat Trough, dynamic analysis, AVO-analysis, Lamé constants, forecast of reservoir properties

Технология метода AVO-анализа (AVA-анализа) основана на изучении поведения амплитуд отражённой волны в зависимости от удаления «взрыв – прибор» (Amplitude Versus Offset) или угла падения (Amplitude Versus Angle) [1; 2].

Анализ эффекта изменения амплитуд отражённых волн позволяет дать дополнительную информацию о литологическом составе пород и предположительном насыщении, для чего существуют физические предпосылки [3].

Особый интерес для выполнения AVO-анализа в условиях карбонатных коллекторов Припятского прогиба представляет детальное изучение сейсмограмм, сохраняющих первичную информацию об амплитудных аномалиях [4].

Особенностью AVO-атрибутов заключается в их получении на основе сейсмограмм и, как следствие, повышенной чувствительности к неоднородностям геологической среды по сравнению с обычными сейсмическими атрибутами [2].

С целью получения сейсмического материала, пригодного для выполнения динамической интерпретации в условиях Припятского прогиба, подбирается оптимальный граф обработки в режиме сохранения истинных амплитуд, позволяющий получить сейсмический куб, который характеризуется хорошей динамической выраженностью во всем временном диапазоне [5].

Теоретическая основа метода AVO-анализа базируется на изучении газовых залежей в терригенных коллекторах [1], для которых набрана большая статистика исследований, однако стоит отметить, что AVO-анализ применяется и имеет ряд положительных результатов в условиях карбонатных коллекторов, в том числе и в Припятском прогибе [4; 6–8].

Анализ амплитудных аномалий, выделяемых на разрезах и картах AVO-атрибутов, позволяет выделять и картировать предположительно аномальные зоны, связанные с отличающимися от вмещающих пород условиями [4].

Исходя из исследований результатов AVO-анализа для карбонатных коллекторов, проводимого в сопоставимых условиях зарубежными авторами, а также на основе анализа исследований, выполняемых ранее в условиях карбонатных коллекторов Припятского прогиба, наиболее информативными атрибутами являются Normal Incidence Reflectivity и Gradient – соответственно AVO-intercept и AVO-gradient, и атрибуты Lambda*Rho Reflectivity и Mu*Rho Reflectivity, характеризующие относительные величины упругих модулей ($\Delta\lambda$ и $\Delta\mu$) [4; 6–8].

С целью более точного определения литологии и предполагаемого насыщения атрибуты Lambda*Rho и Mu*Rho в исследовании были рассчитаны в ходе протестирования инверсионных преобразований, на основе сейсмограмм и кубов акустического и упругого импедансов, и проинтерпретированы по методике, предложенной Гудвеем [3; 9; 10].

С целью идентификации характера аномалий по скважинным данным, необходимой для прогноза фильтрационно-ёмкостных свойств пород, при выполнении динамического анализа, и, в частности, AVO-анализа стандартным является комплекс скважинных данных: результаты ВСП, кросс-дипольный акустический каротаж, плотностной и другие виды каротажа [1; 7; 9; 11].

Анализ скважинных материалов позволил выделить скважину с подходящим набором данных ГИС (рис. 1), где исследуемый интервал литологически представлен доломитами, в кровле породы-коллекторы насыщены нефтью, а средняя и нижняя части коллекторов насыщены пластовой водой.

На основе кросс-дипольного акустического каротажа, а также объёмной плотности в скважине были получены модуль Юнга и коэффициент Пуассона, на основании которых были получены константы Ламе $\lambda\rho$ и $\mu\rho$. Кроссплот между рассчитанными по скважинным данным параметрами, а также параметром пористости позволяет сделать вывод о предположительной возможности выделения по константам Ламе насыщенных пород в условиях карбонатных коллекторов Припятского прогиба и установления литологии (рис. 2) [1; 9; 10]. Диапазон полученных параметров $\lambda\rho$ и $\mu\rho$, находится в интервале 30–60 и 20–40 Гра·гм/см³ соответственно, характеризующий доломиты [3; 10].

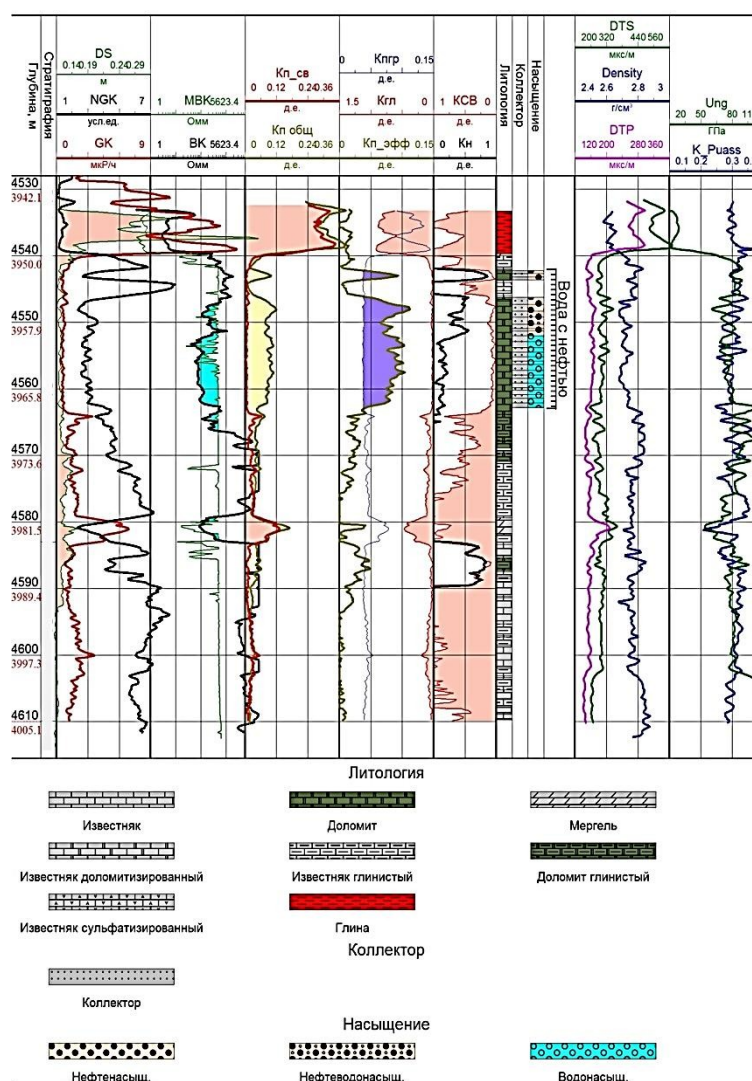


Рис. 1. Рассчитанные кривые физико-механических свойств пород в скважине

Расчет кубов атрибутов Normal Incidence Reflectivity и Gradient, а также кубов $\Lambda\text{mbda} \cdot \text{Rho}$ и $\text{Mu} \cdot \text{Rho}$, характеризующих константы Ламе осуществлялся в интервалах межселевых отложений Красносельского и Южно-Осташковичского месторождений Припятского прогиба, с целью оконтуривания зон, отличающихся по своим фильтрационно-емкостным свойствам [4; 8].

С целью идентификации характера аномалий в сейсмическом волновом поле произведён анализ реальных и синтетических сейсмограмм, созданных на основе данных ГИС в скважинах, в перспективных интервалах.

На основе исследования характера поведения амплитуд на Красносельском месторождении было установлено преобладание в перспективном интервале межселевых отложений характерных признаков AVO-аномалии 1 класса (рис. 3) [4]. Отложения изучаемого интервала межселевой толщи представлены достаточно плотными породами (известняк), насыщенными углеводородами, что оказывает влияние на снижение значения положительного коэффициента отражения на ближних удалениях к отрицательным на дальних, что в теоретическом представлении соответствует аномалии 1 класса типа тусклого пятна [1].

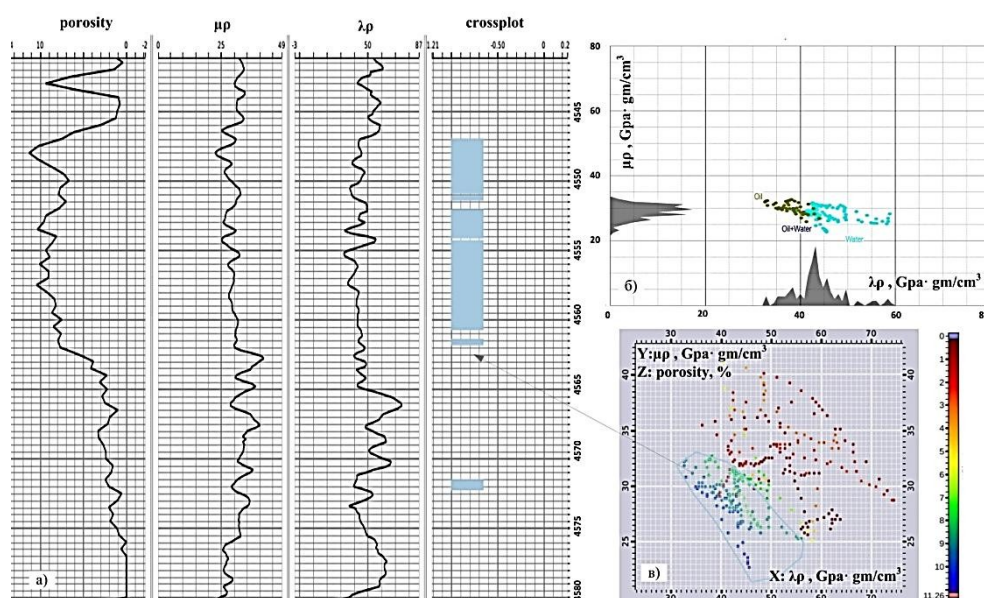


Рис. 2. Анализ результатов моделирования свойств в скважине:

а – кривые пористости, λ_r и μ_r ; б – двумерный кроссплот λ_r и μ_r ;

в – трехмерный кроссплот параметров пористости, λ_r и μ_r

На основании анализа сейсмической волновой картины, синтетических сейсмограмм, рассчитанных по данным ГИС в скважинах, с целью сравнительного сопоставления с реальными сейсмограммами был проанализирован сейсмический материал на Южно-Осташковичском месторождении в интервале межсолевой толщи (рис. 4). В ходе изучения сейсмического материала установлено преобладание отклика среды в классическом представлении схожим с AVO-аномалией 4 класса, характерной для карбонатных пород [1].

Анализ карт атрибутов Normal Incidence Reflectivity и Gradient позволили выделить на кроссплоте область точек, соответствующую AVO-аномалии 1 класса на Красносельском месторождении и аномалии в классическом понимании приуроченные к 4 классу AVO-аномалий на Южно-Осташковичском месторождении и проследить их площадную распространенность.

Анализ атрибутов $\Lambda \cdot \rho$ и $\mu \cdot \rho$ на Красносельском месторождении позволил на основе выделить числовой диапазон λ_r и μ_r соответственно 50–100 и 60–70 GPa·gm/cm³, указывающий на насыщенные известняки [3, 10]. Выделяемые на кроссплоте атрибутов $\Lambda \cdot \rho$, $\mu \cdot \rho$ аномальные области хорошо согласуются с прогнозным распространением залежи [4] и дополняют прогноз фильтрационно-ёмкостных свойств, проведённых другими методами динамического анализа (рис. 5).

На Южно-Осташковичском месторождении анализ кроссплота между парами карт атрибутов $\Lambda \cdot \rho$, $\mu \cdot \rho$ (рис. 6), экстрагированных в интервале межсолевой толщи, позволил на основе выделяемой на кроссплоте области подтвердить литологический состав пород и предполагаемое насыщение, параметры λ_r и μ_r , соответственно, находятся в диапазоне 30–70 и 39–40 GPa·gm/cm³, который является характерным для насыщенных доломитов.

Следует отметить полученные низкие вариации числового диапазона атрибута $\mu \cdot \rho$ для исследуемых месторождений, поскольку данный атрибут практически нечувствителен к наличию флюида и характеризует только плотность скелета породы [3].

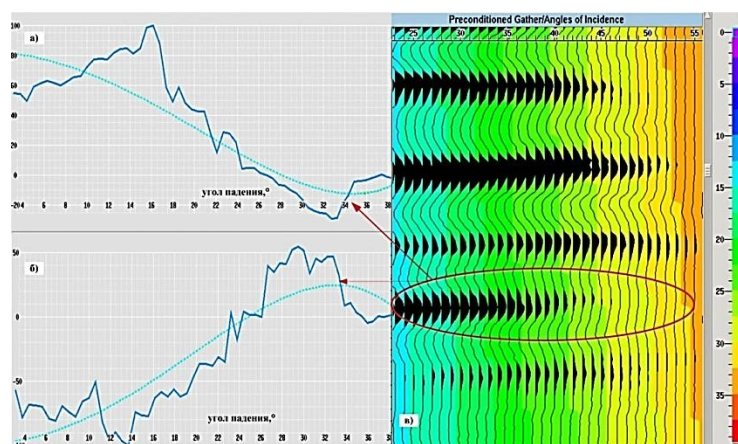


Рис. 3. Анализ поведения амплитуд в перспективном интервале межселевой толщи: а – график поведения амплитуд от кровли исследуемого интервала; б – график поведения амплитуд от подошвы исследуемого интервала; в – сейсмограмма, совмещённая с углами падения. Красносельское месторождение

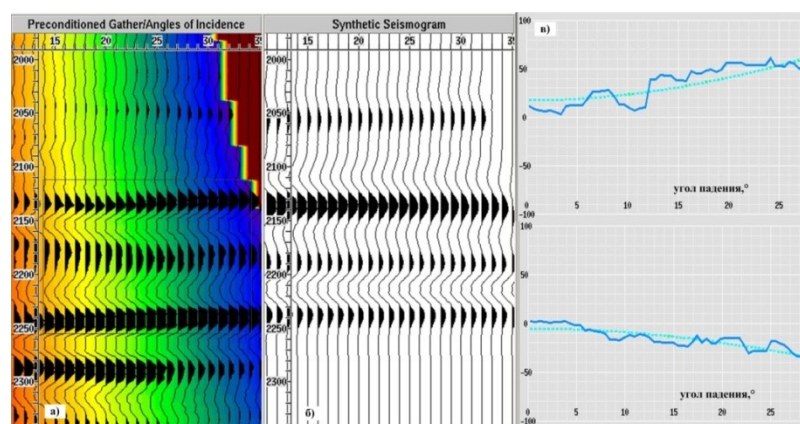


Рис. 4. Анализ поведения амплитуд в перспективном интервале межселевой толщи: а – сейсмограмма, совмещённая с углами падения; б – синтетическая сейсмограмма; в – графики анализа поведения амплитуд в зависимости от удаления. Южно-Осташковичское месторождение

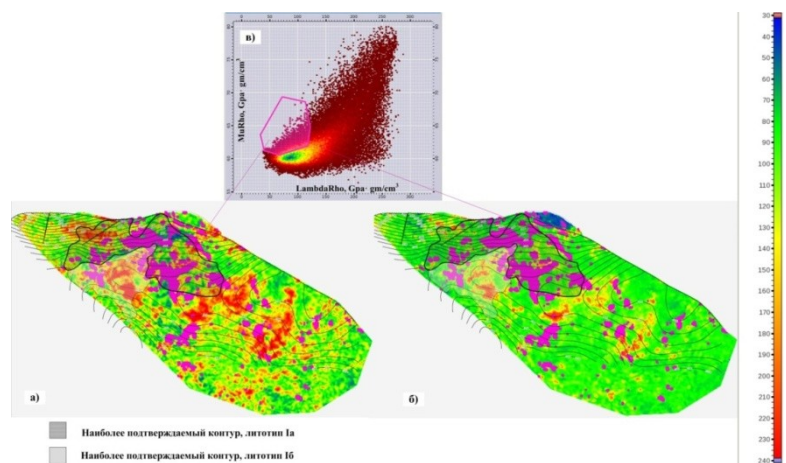


Рис. 5. Результаты анализа карт атрибутов, соответствующих константам Ламе в перспективном интервале межселевой толщи: а – $\Lambda * \rho$; б – $\mu * \rho$; в – кроссплот между картами атрибутов. Красносельское месторождение

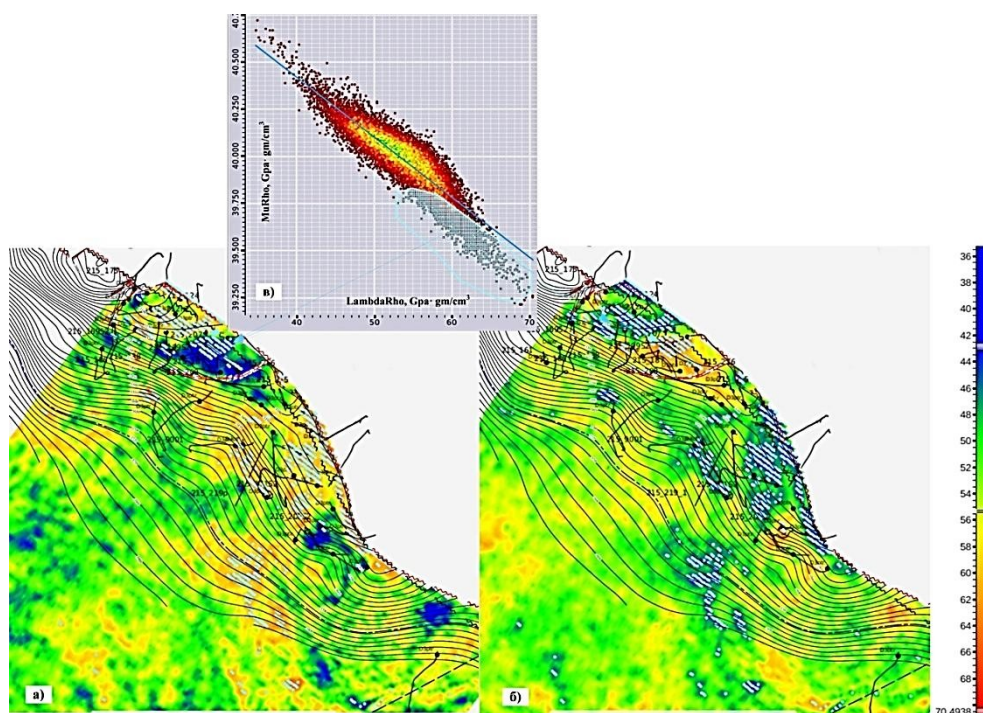


Рис. 6. Результаты анализа карт атрибутов, соответствующих константам Ламе в перспективном интервале межсоловой толщи: а – $\Lambda * \rho$; б – $\mu * \rho$; в – кроссплот между картами атрибутов. Южно-Осташковичское месторождение

Сравнительное сопоставление зон, выделенных в ходе анализа параметров Ламе на картах атрибутов, на исследованных месторождениях, с полученными ранее результатами других методов динамической интерпретации (сейсмофациальный анализ и прогноз эффективных толщин) показал сопоставимую сходимость на качественном и количественном уровне.

Выводы:

- результаты анализа AVO-атрибутов Normal Incidence Reflectivity и Gradient, соответственно AVO-intercept и AVO-gradient, в условиях карбонатных коллекторов межсоловой толщи Припятского прогиба позволяют на качественном уровне выделить и охарактеризовать AVO-аномалии.
- атрибуты $\Lambda * \rho$ и $\mu * \rho$, характеризующие константы Ламе, рассчитываемые в ходе инверсионных преобразований, в совокупности с результатами AVO-анализа позволяют на основе комплексной качественной и количественной оценок петрофизических свойств расширить возможности распознавания литологии и предположительного насыщения, тем самым позволяя детализировать прогноз нефтеперспективных зон в условиях межсоловых отложений карбонатных коллекторов Припятского прогиба.
- выбор оптимального количества атрибутов при проведении AVO-анализа и инверсионных преобразований позволит с большой точностью устанавливать наличие аномалий в сейсмическом волновом поле и уменьшить риск возникновения неопределённости при проведении интерпретации, что, в свою очередь, повысит качество и достоверность выполнения прогноза свойств в межскважинном пространстве в ходе выполнения динамического анализа сейсмических данных.

Список литературы

1. Хилтерман, Ф. Дж. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке / Ф. Дж. Хилтерман ; пер. с англ. И. Артемьева и А. Череповский ; под ред. Г. Голошубина и А. Череповского. – Тверь : ГЕРС, 2010. – 256 с.
2. Воскресенский, Ю. Н. Полевая геофизика / Ю. Н. Воскресенский. – Москва : Недра, 2010. – 479 с.
3. Goodway, B. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters; $\lambda\rho$, $\mu\rho$, and λ/μ fluid stack, from P and S inversions / B. Goodway, T. Chen, J. Downton // CSEG RECORDER. – 1997. – Vol. 22 (no. 7). – P. 183–186.
4. Переволоцкая, Я. А. Применение AVO-анализа для оценки межсолевого комплекса Красносельского месторождения Припятского прогиба / Я. А. Переволоцкая, А. П. Шкрабов // Литасфера. – 2017. – № 1 (46) – С. 129–134.
5. Переволоцкая, Я. А. Алгоритм обработки сейсмического материала для проведения динамического анализа с целью изучения карбонатных коллекторов Припятского прогиба / Я. А. Переволоцкая, Ю. А. Чебурахин, А. С. Конюшенко // Литасфера. – 2018. – № 1 (48) – С. 30–37.
6. Грибик, Я. Г. Повышение точности изучения геологического строения залежей по сейсмическим данным (на примере месторождений нефти Припятского прогиба) / Я. Г. Грибик, А. С. Конюшенко // XVII сессия Межправительственного совета стран Содружества Независимых Государств по разведке, использованию и охране недр (Минск, 13–15 ноября 2013 г.) / редкол. А. М. Ковхута. – Минск, 2014. – С. 3–7.
7. Конюшенко, А. С. Опробывание AVO-анализа, акустической и упругой инверсий для прогнозирования петрофизических свойств пород на примере Оземлинского и Южно-Оземлинского месторождений Припятского прогиба / А. С. Конюшенко // Литасфера. – 2012. – № 2 (37). – С. 112–120.
8. Переволоцкая, Я. А. Качественный прогноз коллекторов Южно-Осташковичского месторождения Припятского прогиба на основе технологии AVO-анализа / Я. А. Переволоцкая // VII Сибирская научно-практическая конференция молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 17–21 ноября 2014 г.) / редкол.: А. Т. Исакова [и др.]. – Новосибирск, 2014. – С. 391–392.
9. Ishiyama, T. AVO applications for porosity and fluid estimation of carbonate reservoirs offshore Abu Dhabi / T. Ishiyama, H. Ikawa, K. Belaid // First break. – 2010. – Vol. 28. – P. 93–100.
10. Li, Y. Recent advances in application of AVO to Carbonate Reservoirs / Y. Li, B. Goodway, J. Downton // CSEG Recorder. – March, 2003. – P. 36–40.
11. Феоктистова, О. В. Снижение неопределенности при выявлении аномалий, связанных с газонасыщением, по технологии AVO-анализа на территории Вилуйской синеклизы / О. В. Феоктистова // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 9. – С. 108–114.

References

1. Hilterman, F. Dzh. *Interpretatsiya amplitud v seysmorazvedke* [Interpretation of amplitudes in seismic]. Ed. by G. Golosubina, A. Cherepovskiy. Tver, GERS Publ., 2010, 256 p.
2. Voskresenskiy, Yu. N. *Field Geophysical Exploration*. Moscow, Nedra Publ., 2010, 479 p.
3. Goodway, B., Goodway, B., Chen, T., Downton, J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters; $\lambda\rho$, $\mu\rho$, and λ/μ fluid stack, from P and S inversions. *CSEG RECORDER*, 1997, vol. 22 (no. 7). – P. 183–186.
4. Perevolockaya, Ya. A., Shkrabau, A. P. The application of AVO-analysis for estimation of the intersalt complex of Krasnoselskoe field of Pripyat Trough. *Lithosphere*, 2017, no. 1 (46), pp. 129–134.
5. Perevolockaya, Ya. A., Cheburakhin, Yu. A., Konyushenko, A. S. The algorithm for processing of seismic data for carrying out of dynamic analysis with the purpose of studying carbonate reservoirs of the Pripyat Trough. *Lithosphere*, 2018, no. 1 (48), pp. 30–37.
6. Gribik, Ya. G., Konyushenko, A. S. Povyshenie tochnosti izucheniya geologicheskogo stroeniya zalezhej po seismicheskim dannym (na primere mestorozhdenij nefiti Pripyatskogo progiba). XVII session of the Intergovernmental Council of the Commonwealth of Independent States for the exploration, use and protection of mineral resources (Minsk, November 13–15, 2013). Ed. by A. M. Kovhuto. Minsk, 2014, pp. 3–7.
7. Konyushenko, A. S. Testing of AVO-analysis, acoustic and elastic inversion for forecasting the rock petrophysical properties at the Ozemlya and Southern Ozemlya deposits of the Pripyat Trough taken as examples. *Lithosphere*, 2012, no. 2 (37), pp. 112–120.
8. Perevolockaya, Ya. A. Kachestvennyy prognoz kolektorov Yuzhno-Ostashkovichskogo mestorozhdeniya Pripyatskogo progiba na osnove tekhnologii AVO-analiza [Qualitative forecast of the reservoirs of the Yuzhno-Ostashkovichskoye field of the Pripyat trough based on the AVO-

analysis technology]. *VII Sibirskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh po naukam o Zemle (Novosibirsk, 17–21 noyabrya 2014 g.)* [VII Siberian Scientific and Practical Conference of Young Scientists on Earth Sciences (Novosibirsk, November 17–21, 2014)]. Ed. by A. T. Isakova [et al.]. Novosibirsk, 2014, pp. 391–392.

9. Ishiyama, T., Ikawa, H., Belaid, K. AVO applications for porosity and fluid estimation of carbonate reservoirs offshore Abu Dhabi. *First break*, 2010, vol. 28, pp. 93–100.

10. Li, Y., Goodway, B., Downton, J. Recent advances in application of AVO to Carbonate Reservoirs. *CSEG Recorder*, March, 2003, pp. 36–40.

11. Feoktistova, O. V. Snizhenie neopredelennosti pri vyyavlenii anomalii, svyazannykh s gazonasyshtcheniem, po tekhnologii AVO-analiza na territorii Vilyuyskoy sineklizy [Reducing uncertainty in identifying anomalies associated with gas saturation using the AVO-analysis technology on the territory of the Vilyui syncline]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science], 2017, no. 9, pp. 108–114.

ВЕРХНЕМЕЛОВОЙ АНАПСКИЙ ФЛИШ КАК СТРУКТУРА АНТИКЛИНОРИЯ БОЛЬШОГО КAVКАЗА

Реймерс Алексей Николаевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация, 119234, г. Москва, ул. Воробьевы горы, 1, e-mail: areimers@mail.ru

Сотникова Диана Юрьевна, студент, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация, 119234, г. Москва, ул. Воробьевы горы, 1, e-mail: sot1999@yandex.ru

В общей геологии и морфологии северо-восточного побережья Чёрного моря существенную роль играет структура флиша. Исследования флишевых формаций помогает воссоздать палеообстановку, в которой происходило накопление осадка и формирование пород. Анапский флиш кавказского типа представляет собой последовательное переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов. Структура флиша имеет своеобразное строение – включает более мягкие слои глинистых минералов, которые выветриваются, оставляя выступы более прочных песчаников. К флишу могут быть приурочены залежи нефти и минеральных вод. Для кавказского флиша характерны крупные запасы цементного сырья – верхнемеловых известняков и мергелей. В разрезе анапского верхнемелового флиша наблюдается ожелезнение пород, а также встречаются лимонитовые конкреции. На некоторых участках разреза наблюдаются трещины, инкрустированные кальцитом. В работе проанализированы текстурно-структурные особенности и сделаны выводы о том, что формирование флиша происходило в нижней части глубоководного конуса выноса, так как наблюдается переслаивание песчаников и более мелкозернистого глинистого материала по всему разрезу. Присутствие карбонатного материала свидетельствует о перерыве схода мутьевых потоков, а также позволяет определить обстановку осадконакопления тёплого неглубокого моря.

Ключевые слова: флиш, циклит, ритм, турбидитный поток, обстановка осадконакопления, горизонтальная слоистость, волнистая слоистость, конкреции, красноцветные песчаники, структура, седиментация, конус выноса, глинистый материал, ожелезнение

UPPER CRETACEOUS ANAPA FLISH, AS A STRUCTURE OF THE ANTICLINORIUM OF THE GREATER CAUCASUS

Reimers Aleksey N., Ph. D. in Geology and Mineralogy, Assistant Professor, Lomonosov Moscow State University, 1 Vorobevy gory St., Moscow, 119234, Russian Federation, e-mail: areimers@mail.ru

Sotnikova Diana Y., student, Lomonosov Moscow State University, 1 Vorobevy gory St., Moscow, 119234, Russian Federation, e-mail: sot1999@yandex.ru

In the General Geology and morphology of the North-Eastern Black sea coast near the city of Anapa, flish structures play a significant role. Research flysch formations helps to recreate palaeobotanik in which there was an accumulation of sediment and formation of rocks. The Anapa flysch of the Caucasian type is a sequential interbedding of sandstones, siltstones, and mudstones. The flysch structure has a peculiar structure – it includes softer layers of clay minerals that are eroded, leaving protrusions of stronger sandstones. Sometimes oil and mineral water deposits may be associated with the flush. The Caucasian flysch is characterized by large reserves of cement raw materials –