

Особенности геологического строения и петрофизического моделирования продуктивных отложений усть-кутского горизонта (Непско-Ботубинская область)

Дистанова Л.Р., Коваленко Е.В., Аржиловская Н.Н., Максимова Е.Н.,
Неделько О.В., Чертина К.Н.

ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия
lrdistanova@tnnc.rosneft.ru

Аннотация

В работе рассматриваются особенности геологического строения и петрофизического моделирования продуктивных отложений усть-кутского горизонта Северо-Даниловского месторождения Непско-Ботубинской нефтегазоносной области. Отложения характеризуются сложным распределением в разрезе пластов-коллекторов и крайне изменчивыми фильтрационно-емкостными свойствами. Проведен комплекс лабораторных исследований, разработана седиментационно-емкостная модель пустотного пространства, учитывающая специфичность состава отложений горизонта и фациальную неоднородность строения толщи. Представленные в работе подходы открывают возможности для прогноза наиболее перспективных по фильтрационно-емкостным характеристикам зон и интервалов разреза.

Материалы и методы

Материалы: макро- и микроописания керна материала, лабораторные исследования, фациальная диагностика карбонатных пород, корреляция кривых геофизических исследований скважин, сопоставление фациальных обстановок осадконакопления, картографические построения, петрофизическое моделирование, анализ петрофизических зависимостей.

Ключевые слова

органогенные постройки, нижнеустькутский горизонт, сублитораль, петрофизическое моделирование, седиментационно-емкостная модель

Для цитирования

Дистанова Л.Р., Коваленко Е.В., Аржиловская Н.Н., Максимова Е.Н., Неделько О.В., Чертина К.Н. Особенности геологического строения и петрофизического моделирования продуктивных отложений усть-кутского горизонта (Непско-Ботубинская область) // Экспозиция Нефть Газ. 2022. № 3. С. **–**. DOI: 10.24412/2076-6785-2022-3-**-**

Поступила в редакцию: 19.04.2022

GEOLOGY

UDC 550.8.052 | Original Paper

Geological setting and petrophysical modeling features of Ust-Kut Carbonate Reservoirs (Nepa-Botuoba Petroleum Province)

Distanova L.R., Kovalenko E.V., Arzhilovskaya N.N., Maksimova E.N., Nedelko O.V., Chertina K.N.

"Tyumen petroleum research center" LLC, Tyumen, Russia
lrdistanova@tnnc.rosneft.ru

Abstract

This article contains detailed geological description and petrophysical modeling features of productive deposits in the Ust-Kutsky horizon of the North Danilovskoye Field of the Nepa-Botuoba Petroleum Province (NBP). The sediments have rather complex vertical distribution and variable reservoir properties. A complex of laboratory studies has been made and sedimentation-capacitive model of the pore space was developed according to the fact of the specific composition of sediments and facies heterogeneity. The presented approaches open up opportunities for the highest reservoir properties zones discovering.

Materials and methods

Materials: macro and micro core descriptions, laboratory researches, Interpretation of facies well logs correlation, well correlation, facies correlation, mapping, petrophysical modeling, petrophysical functions analysis.

Keywords

carbonates, organogenic buildup, the Lower Ust-Kutsky horizon, sublittoral, petrophysical modeling, sedimentation-capacitive model

For citation

Distanova L.R., Kovalenko E.V., Arzhilovskaya N.N., Maksimova E.N., Nedelko O.V., Chertina K.N. Geological setting and petrophysical modeling features of Ust-Kut Carbonate Reservoirs (Nepa-Botuoba Petroleum Province). Exposition Oil Gas, 2022, issue 3, P. **–**. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2022-3-**-**

Received: 19.04.2022

Введение

Центральные районы Непского свода представляют значительный интерес в нефтегазовом отношении. На сегодняшний день основной объем прироста запасов нефти в новых месторождениях приходится на карбонатные венд-кембрийские отложения осинского, усть-кутского, преобразенского горизонтов.

Объектом исследования являются карбонатные пласты Б5 и Б6 нижеустькутского горизонта тэтэрской свиты венд-кембрия Северо-Даниловского месторождения.

Цель данной работы заключается в разработке седиментационно-емкостной модели пустотного пространства продуктивного коллектора усть-кутского горизонта.

Актуальность работы. Впервые разработана седиментационно-емкостная модель пустотного пространства, учитывающая специфичность состава отложений усть-кутского горизонта и фаціальную неоднородность строения толщ.

Методы исследований

Комплексом лабораторных работ было изучено 9 разрезов скважин отложений усть-кутского горизонта, представленных 243 м кернового материала. Керна отобраны практически со 100 % выносом, диаметром 80 и 100 мм. Лабораторные исследования включали в себя: литолого-седиментологическое описание

керна; минералогические исследования — рентгеноструктурный анализ общего состава породы и пелитовой фракции; определение элементного состава (рентгенофлуоресцентный анализ); изучение образцов пород при больших увеличениях (в несколько тысяч раз) с использованием растрового электронного микроскопа.

Исследовано около 250 шлифов, по которым был изучен вещественный состав, структурные особенности, морфология пустотного пространства и постседиментационные изменения пород. Характеристика коллекторских свойств пород получена в результате обработки 930 определений пористости и проницаемости на образцах стандартного размера (диаметр 30 мм) и 250 определений на полно-размерных образцах (диаметр 100 мм).

Анализ результатов

Пласты Б5 и Б6 в соответствии с ныне действующей стратиграфической схемой приурочены к тэтэрской свите даниловского горизонта венд-кембрийской системы. В даниловском горизонте прослеживаются два пласта — усть-кутский I (Б3-4) и усть-кутский II (Б5 и Б6), разделенные глинисто-сульфатно-карбонатной перемычкой мощностью 5–10 м. Флюидоупор верхнего пласта представлен галогенно-карбонатными отложениями усовской свиты. Основными породами, слагающими карбонатные коллекторы

усть-кутского продуктивного горизонта, являются доломиты.

Отложения характеризуются сложным распределением в разрезе пластов-коллекторов и крайне изменчивыми фильтрационно-емкостными свойствами: при одинаковой пористости отличие по проницаемости составляет несколько порядков (от 1 до 2 000 мД); наблюдается неравномерное изменение вторичной емкости коллекторов — каверчновой пористости, которая изменяется по абсолютному значению от долей процента до 8–12 % и составляет долю от общей пористости от первых процентов до 20–40 %. По размеру каверны в основном мелкие — до 4–5 мм, в единичных случаях встречаются полости диаметром 25–30 мм. Кроме того, породы осложнены засолением и наличием в поровом пространстве органического вещества и битумов.

Обоснование петрофизической модели и дальнейшее построение трехмерной геологической модели залежи должно опираться на седиментационную модель продуктивных толщ, поскольку одним из основных факторов, контролирующих образование и сохранение коллекторов в процессе литогенеза, являются условия их накопления. Последующее действие вторичных преобразований проявляется фаціально избирательно.

Отложения усть-кутского горизонта формировались на территории протяженной

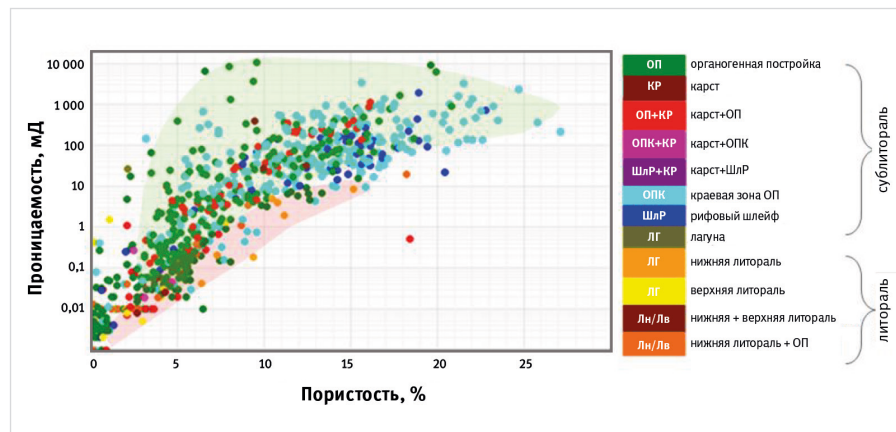


Рис. 1. Изменение ФЕС пород по фаціям нижнеустькутского горизонта (оранжевое поле — литораль, зеленое поле — сублитораль)

Fig. 1. Reservoir properties change by facies of the Lower Ust-Kutsky horizon (orange area — littoral, green area — sublittoral)

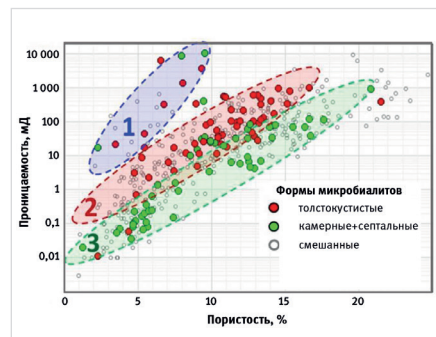


Рис. 2. Сравнение пористости (K_p) и проницаемости (K_{fp}) доломитов с различными типами «микробиялитов» (1, 2, 3 — области распределения ФЕС пород)

Fig. 2. Dolomite porosity and permeability distribution by “microbialites” types (1, 2, 3 — distribution areas of reservoir properties)

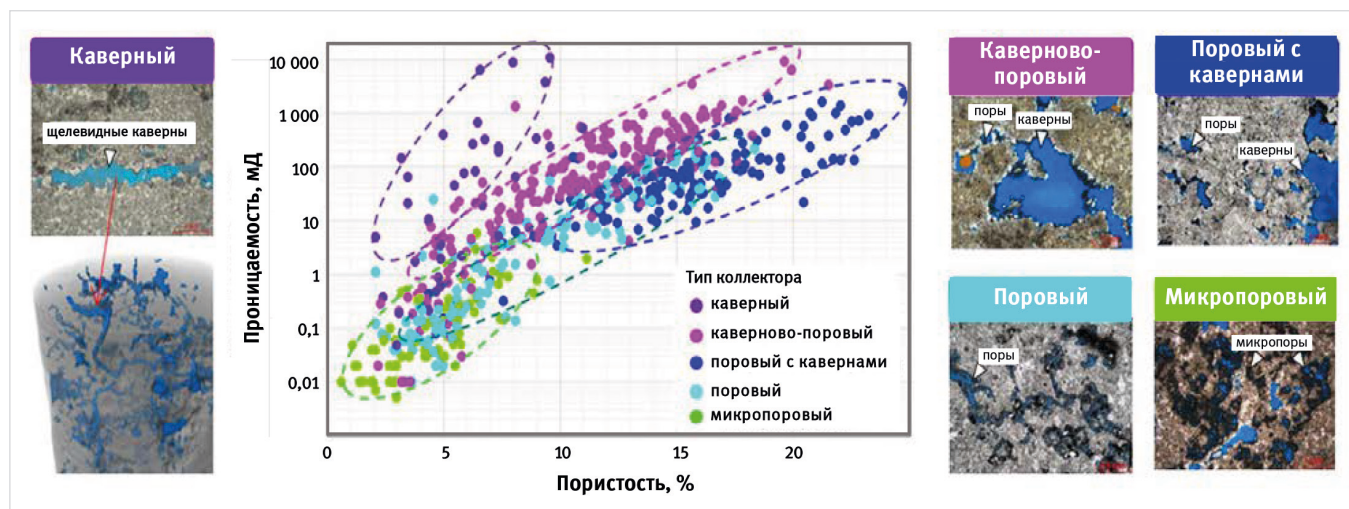


Рис. 3. Характеристика пород по типу коллектора (пустотного пространства)

Fig. 3. Reservoir types by the pore space

выровненной эпиконтинентальной платформы. Положение современной Даниловской структуры на профиле седimentации в венд-кембрийский период предопределило господство в составе разреза отложений мелководной литорали и сублиторали с периодическими переходами до лагунных.

Для восстановления условий формирования продуктивных отложений были изучены разрезы скважин, наиболее полно охарактеризованные керновым материалом. Фациальная диагностика карбонатных пород проводилась на основе целенаправленной «генетической» интерпретации материалов — детального макро- и микроскопического изучения керна. В результате были выделены фациальные комплексы (например, карст, краевая часть органогенной постройки (ОПК)), которые в дальнейшем рассматривались с точки зрения изменения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород (Кп, Кпр) (рис. 1).

Как показано на рисунке 1, лучшими фильтрационно-емкостными свойствами характеризуются породы, относящиеся к мелководной сублиторали, низкие ФЕС имеют отложения нижней литорали.

Органогенные постройки (ОП) пласта Б5 выделены во всех изучаемых скважинах и представлены доломитами микро-тонкокристаллическими, органогенными, микробиально-водорослевыми, со структурой баундстоун. В разрезе распознаны характерные виды каркасостроителей цианобактериальных сообществ типа Renalcis [8], которые встречаются с микривым, разномерным заполнением пакстоун, грейнстоун. Были определены разновидности микробиально-водорослевых сообществ («микробиалитов») (рис. 2), тип цемента (межкаркасного заполнителя) и формы роста каркасостроителей. Кроме того, при визуальном анализе колонки керна и по данным рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) определен тип пустотного пространства (рис. 3). Лучшие свойства органогенных построек связаны с присутствием толстокустистых форм микробиалитов (область 2 на рис. 2), а также с наличием связанных каналов фильтрации — щелевидных каверн, образовавшихся в результате выщелачивания трещин (область 1 на рис. 2). Однако последние хорошо наблюдаются только в кернах, а по разрезу имеют малую мощность (0,1–0,2 м), поэтому по методам геофизических исследований скважин (ГИС) выделить такие прослои не представляется возможным. Тип коллектора (пустотного пространства) обусловлен в большей степени типом микробиально-водорослевых сообществ.

Разрезы карбонатных отложений, накопившиеся в условиях литорали, сублиторали, имеют циклическое строение, вызванное эвстатическими причинами [1–4]. Для того, чтобы перейти от петрофизических зависимостей к реальным объектам, в разрезе изученных отложений было дополнительно прокоррелировано и выделено 5 пачек в пласте Б5 как относительно небольших по мощности совокупности слоев, характеризующихся общностью признаков, выделенных на основе анализа следующей информации: характеристики выделенных фаций, их долевого участия, результатов палеоструктурных построений, анализа формы кривых электрического, радиоактивного и плотностного каротажа.

Для диагностики пачек в разрезе также учитывалось, что толщины разновозрастных

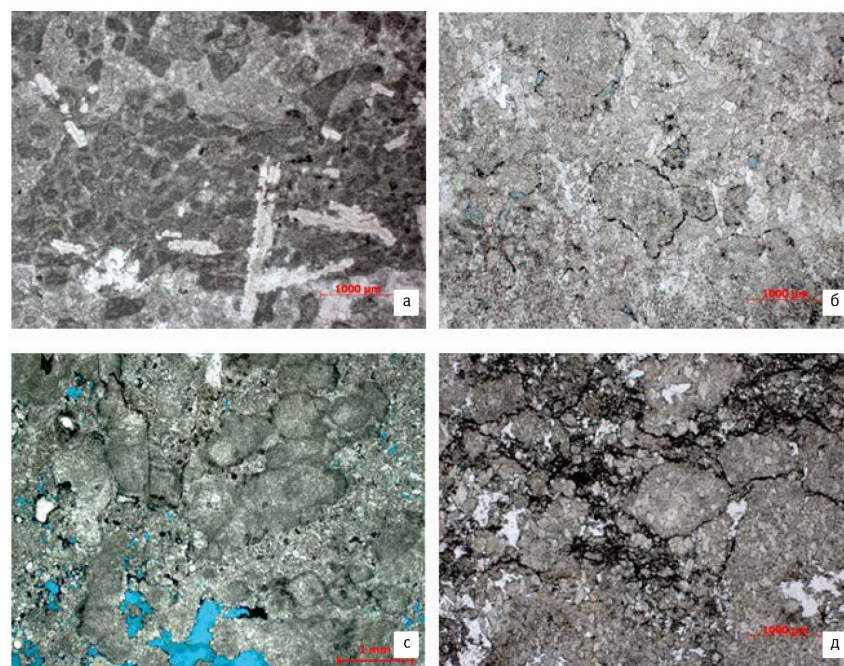


Рис. 4. Фото шлифов. Доломиты верхней литорали пласта Б6 (а), мелководной сублиторали (б, с, д) пласта Б5. Вид — без анализатора, увеличение 25х
Fig. 4. Thin sections. Dolomites from the upper littoral zone of B6 (a), shallow sublittoral (b, c, d) of B5. View – without analyzer, magnification 25x

слоев и слагающих их пачек будут близки, поскольку они накапливались в условиях выровненных площадей с практически одинаковым пространством аккомодации; последовательная смена фаций в разрезе будет отражать единую направленность процесса осадконакопления [4, 7].

Снизу вверх рассмотрим строение пластов Б5 и Б6 усть-кутского горизонта (рис. 4, 5).

Для рассматриваемой территории формирование пласта Б6 (пачка 6) происходило в условиях литорали, в верхней части

разреза породы переходят в отложения лагуны. Общая мощность пласта 2,05–4,4 м. Породы представлены микрокристаллическими строматолитовыми доломитами с ламинарной слоистостью, доломитами со структурой мадстоун с мелкими редкими литокластами. Тонкопористая структура пустотного пространства характеризуется низкими значениями проницаемости, повышенной долей среди всех пор капиллярных и субкапиллярных. На рисунке а представлено фото шлифа доломита — литокластово-фитокластовый пакстоун верхней литорали.

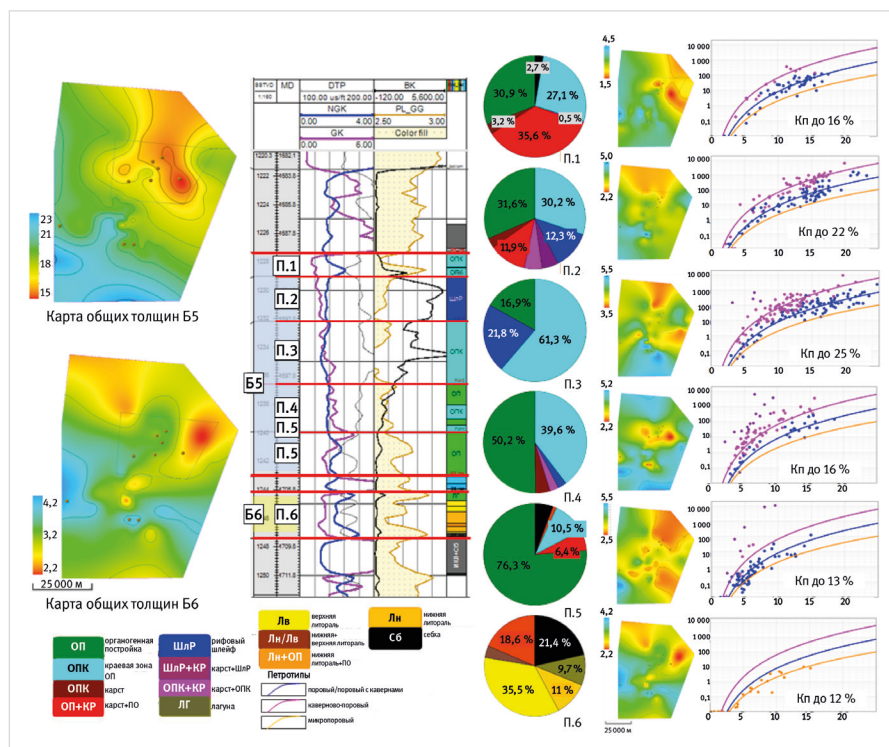


Рис. 5. Строение отложений усть-кутского горизонта
Fig. 5. Reservoir structure of the Ust-Kut horizon

Коллекторы характеризуются небольшой мощностью 3–4 м, небольшой пористостью до 10–12 %, тип пустотного пространства — микропоровый, реже поровый. Коллекторы с улучшенными ФЕС связаны с отложениями верхней литорали, что объясняется высокой гидродинамикой среды.

Ко времени накопления пород пласта Б5 территория погрузилась, и формирование отложений происходило в условиях мелкой сублиторали. Общая толщина пласта Б5 составляла 14–23 м. Затопление территории привело к увеличению аккомодационного пространства, в результате чего образовались толщи **органогенных построек (ОП)** (рис. 46) на всей территории исследования — пачка 5. ОП представлена микробильно-водорослевым баундстоуном. На востоке обмеление территории привело к уменьшению аккомодационного пространства, уменьшению роста построек и их разрушению под действием волновых процессов. В результате в разрезе выделяются фации краевой части ОП (ОПК). Мощность пачки 2,6–5,5 м, отложения характеризуются небольшой пористостью — до 13 %, тип пустотного пространства — поровый, редко каверново-поровый и каверновый.

Пачка 4 — распространенной в пачке является фация органогенной постройки и краевой части органогенной постройки, что говорит о дальнейшем накоплении построек и их переработке, в результате сокращения пространства аккомодации за счет быстрого роста ОП, и в целом говорит об обмелении территории. Мощность пачки 3–5,2 м характеризуется небольшой пористостью до 16 %, тип коллектора — каверново-поровый, поровый, местами каверновый.

Пачка 3 начинает верхнюю часть разреза. Юг территории был более погружен и менее подвержен приповерхностным условиям, поэтому преобладающими фациями в пачке являются органогенные постройки. Севернее за счет уменьшения аккомодационного пространства постройки разрушаются, образуя продукты переработки органогенной постройки: фации ОПК (краевая часть органогенной постройки) и ШЛР (рифовый шлейф). Пример доломита фации ОПК, представленный микробiallyно-водорослевым баундстоуном, чередующимся с разнозернистым литокластовым грейнстоуном-рудстоуном, показан на рисунке 4с; фации ШЛР — крупнозернистого фитокластового грейнстоун-рудстоун — на рисунке 4д.

Лучшие коллекторы связаны с этой пачкой за счет обилия зернистого материала в межскелетных промежутках фации ОПК и разноразмерными тонко-микрокристаллическими доломитами со структурами грейнстоун, рудстоун фации рифового шлейфа. Относительно высокая и изменчивая гидродинамика создавала условия для образования и осаждения разноразмерного материала и низкого содержания в зернистых осадках микритовой составляющей, заполняющей седиментационно-раннедиагенетические поры. В конечном итоге это обеспечило хорошие фильтрационные возможности карбонатов.

В общем балансе коллекторов пласта Б5 на площади также значимыми являются отложения пачки 2.

Пачки 2 и 3 содержат фации, характеризующие обмеление территории. Отложения располагались близко к поверхности размыва и имеют повышенные значения пористости и проницаемости. Отложения характеризуются низкой плотностью и высокой пористостью

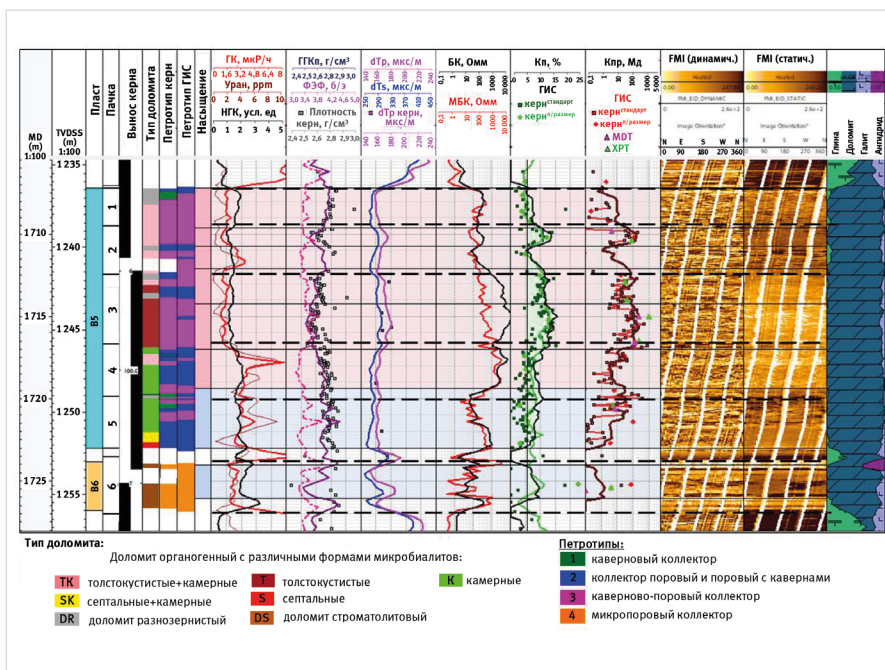


Рис. 6. Пример определения $K_{пр}$ по разрезу с учетом седиментационной неоднородности
Fig. 6. An example of estimating the vertical distribution of permeability, taking into account the sedimentation heterogeneity of reservoirs

до 22–25 %, тип коллектора — каверно-во-поровый, поровый с кавернами, редко поровый, единичные образцы с каверновым типом.

Последующее накопление пачки 1 отражает погружение территории, в разрезе преобладают фации ОП. Отложения завершают разрез пласта Б5, имеют различный объем, так как приповерхностная часть была разрушена в результате перерыва в осадконакоплении. Отмечаются карстопоявления за счет выхода пород под поверхность размыта. Однако в целом фильтрационные возможности пачки 1 довольно низки, поскольку в процессе последующего погружения эти пустоты в первую очередь были заполнены эпигенетическими минералами.

По результатам лабораторных исследований керна было обосновано выделение четырех петротипов коллектора (каверновый, каверново-поровый, поровый/поровый с кавернами, микропоровый) [5, 6]. Каверновый тип коллектора представлен маломощными прослоями (до 0,2 м), поэтому спрогнозировать его по ГИС не представлялось возможным.

Выделение петротипов по данным ГИС проводилось с помощью одной из разновидностей нейронных сетей — самоорганизующихся карт Кохонена. На вход подавались следующие параметры: суммарное водородосодержание породы (ΣW), интервальное время пробега продольной и поперечной волны по данным акустического каротажа (АК), **объемная плотность по данным гамма-гамма-плотностного каротажа (ГГК-п)**. Привлечение методов гамма каротажа (ГК) и литоплотностного каротажа (ГГКлп) не влияет существенным образом на модель, так как «глинистость» пласта Б5 незначительная, а по литологическому составу породы-коллекторы представлены практически чистыми доломитами.

В коллекторах выполнялось моделирование петротипов 2, 3 отдельно для групп пачек 1+2+3, 4+5 и 6. В пачке 6 (пласт Б6) наблюдается только петротип 4.

Используя для каждого выделенного петротипа свою зависимость коэффициента

проницаемости ($K_{пр}$) от коэффициента пористости (K_p), можно рассчитать коэффициент проницаемости непрерывно по разрезу. Как показано на примере (рис. 6), рассчитанные величины $K_{пр}$ хорошо согласуются с данными измерений на керне и пересчитанными значениями по ХРТ/МДТ.

Итоги

На формирование ФЕС пласта Б5 и Б6 в значительной степени влияют состав и структура первичного известкового осадка. Наиболее высоким емкостным потенциалом в разрезе неиньектующего горизонта обладают разнотекстурные осадки фации краевой части органогенной постройки и рифового шлейфа, которые преобладают в верхней части разреза (пачки 2 и 3) с каверновым и каверново-поровым типом коллектора, что обусловлено обмелением территории осадконакопления в данный период. Наименьшими ФЕС обладают отложения нижней литорали пачки 6 (пласт Б6) с микропоровым типом пустотного пространства.

Выводы

Формирование емкостных свойств породы — сложный длительный процесс, связанный с различными этапами накопления осадка и породы. Доминирующую роль в нем играют седиментационные признаки, заложенные в осадочную систему еще в период осадконакопления. Это определяет структуру пустотного пространства, а также интенсивность и направленность дальнейших преобразований.

Для наиболее достоверного расчета коэффициента проницаемости пород, максимально приближенного к реальным свойствам сложного карбонатного объекта, выбран способ интегрированного моделирования, учитывающий седиментационную неоднородность коллекторов и сложное распределение их по разрезу. Представленные в работе подходы открывают возможности для прогноза наиболее перспективных по фильтрационно-емкостным характеристикам зон и интервалов в тех частях разреза, где керна

отсутствует и имеются лишь данные каротажа. Выявленные закономерности послужат основой для дальнейшего геологического моделирования.

Литература

1. Багринцева К.И. Основные факторы, определяющие формирование и сохранение высокочемких коллекторов в карбонатных формациях // Эволюция карбонатного накопления в истории Земли. М.: Наука, 1988. С. 199–222.
2. Губина Е.А. Прогноз венд-нижнекембрийских карбонатных

коллекторов нефти и газа центральной части Непско-Ботубинской антеклизы на основе модели их формирования. Санкт-Петербург: 2014. 22 с.

3. Жемчугова В.А. Резервуарная седиментология карбонатных отложений. М.: ЕАГЕ Геомодель, 2014. 232 с.
4. Жемчугова В.А. Природные резервуары в карбонатных формациях Печорского нефтегазоносного бассейна. М.: Московский государственный горный университет, 2002. 243 с.
5. Лидер М.Р. Седиментология. Процессы и продукты. М.: Мир, 1986. 439 с.

6. Лусиа Ф. Дж. Построение геолого-гидродинамической модели карбонатного коллектора: интегрированный подход. М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. 384 с.
7. Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления. М.: Недра, 1989. 293 с.
8. Brian R. Pratt., Epiphyton and renalcis – diagenetic microfossils from calcification of coccooid blue-green algae. AAPG Bulletin, 1984, Vol. 54, issue 3, P. 948–971. (In Eng).

ENGLISH

Results

The composition and structure of primary calcareous sediments of the B5 and B6 formations affect the development of reservoir properties. The highest flow potential of Lower Ust-Kut reservoirs belongs to granular sediments of an organogenic buildup destruction products with vuggy and vuggy-pore reservoir types. Sediments of a shallow littoral zone with micropore reservoir type (B6 formation) have the poorest reservoir properties.

Conclusions

The formation of reservoir properties is a complex long process associated with various stages of sediment and rock accumulation. The

dominant role in it is played by sedimentary features incorporated into the sedimentary system even during the period of sedimentation. This determines the structure of the pore space, as well as the intensity and direction of further transformations.

To estimate the permeability more correctly, one should take into account the sedimentation heterogeneity of reservoirs and their complex vertical distribution. The presented approaches open up opportunities for the highest reservoir properties zones discovering. The revealed patterns will serve as a basis for further geological modeling.

References

1. Bagrintseva K.I. The main factors determining the formation and preservation of high-capacity reservoirs in carbonate formations. Evolution of carbonate accumulation in the history of the Earth. Moscow: Nauka, 1988, P. 199–222. (In Russ).
2. Gubina E.A. Forecast of Vendian-Lower Cambrian carbonate reservoirs of oil and gas in the central part of the Nepa-Botuoba antecline based on the model of their formation. St. Petersburg, 2014, 22 p. (In Russ).

3. Zhemchugova V.A. Reservoir sedimentology of carbonate deposits. Moscow: EAGE Geomodel, 2014, 232 p. (In Russ).
4. Zhemchugova V.A. Natural reservoirs in carbonate formations of the Pechora oil and gas basin. Moscow: Publishing House of the Moscow State Mining University, 2002, 243 p. (In Russ).
5. Leader M.R. Sedimentology. Processes and products. Moscow: Mir, 1986, 439 p. (In Russ).
6. Lusua F. Jerry. Carbonate reservoir characterization. M., Izhevsk: Research

Center “Regular and Chaotic Dynamics”, Izhevsk Institute of Computer Research, 2010, 384 p. (In Russ).

7. Selly R.Ch. Ancient environments of sedimentation. Moscow: Nedra, 1989, 293 p. (In Russ).
8. Brian R. Pratt., Epiphyton and renalcis – diagenetic microfossils from calcification of coccooid blue-green algae. AAPG Bulletin, 1984, Vol. 54, issue 3, P. 948–971. (In Eng).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дистанова Лилия Робертовна, к.г.-м.н., главный специалист управления научно-технического развития, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия
Для контактов: lrdistanova@tnnc.rosneft.ru

Коваленко Елена Викторовна, главный специалист управления научно-технического развития, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

Аржиловская Наталья Николаевна, начальник отдела минералогических и петрографических исследований, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

Максимова Екатерина Николаевна, главный специалист отдела минералогических и петрографических исследований, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

Неделько Ольга Валерьевна, заведующий лабораторией изучения карбонатных коллекторов, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

Чертина Ксения Николаевна, заведующий лабораторией петрографических исследований, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

Distanova Liliya Robertovna, ph.d., chief specialist of the scientific and technical development department, “Tyumen petroleum research center” LLC, Tyumen, Russia
Corresponding author: lrdistanova@tnnc.rosneft.ru

Kovalenko Elena Viktorovna, chief specialist of the scientific and technical development department, “Tyumen petroleum research center” LLC, Tyumen, Russia

Arzhilovskaya Natalya Nikolaevna, head of the mineralogical and petrographic research department, “Tyumen petroleum research center” LLC, Tyumen, Russia

Maksimova Ekaterina Nikolaevna, chief specialist of the mineralogical and petrographic research department, “Tyumen petroleum research center” LLC, Tyumen, Russia

Nedelko Olga Valeryevna, head of the carbonates research laboratory, “Tyumen petroleum research center” LLC, Tyumen, Russia

Chertina Ksenia Nikolaevna, head of the petrographic research laboratory, “Tyumen petroleum research center” LLC, Tyumen, Russia