

УДК 552.578.2.061.44:553.98.061.16(470.13)

**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПАЛЕОКАРСТОВЫХ
СТРУКТУР В ДОМАНИКОВО-СИРАЧОЙСКИХ КАРБОНАТНЫХ
ОТЛОЖЕНИЯХ ИЖМА-ПЕЧОРСКОЙ ВПАДИНЫ
ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ**

**AN INTEGRATED APPROACH FOR DOMANIK-SIRASHOY
PALEOKARST ZONES IDENTIFICATION IZHMA-PECHORA
DEPRESSION, TIMAN-PECHORA BASIN**

Скворцов А. А., Кулешов В. Е.

**ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический
университет», г. Ухта, Российская Федерация**

A. A. Skvortsov, V. E. Kuleshov

**FSBEI NPE “Ukhta State Technical University”,
Ukhta, the Russian Federation**

e-mail: mailanton@mail.ru

Аннотация. Системы палеокарстовых структур являются результатом процессов карстования, последующего уплотнения осадков и диагенезиса. Такие системы в совокупности могут формировать важный тип карбонатного коллектора, имея достаточно большие объемы порового пространства (каверны, дополнительные трещины после обрушения), но в то же время могут быть значимым фактором, способствующим развитию неоднородности и расчлененности карбонатного коллектора. Важнейшим условием этого является заполнение пор и трещин твердыми минералами (такими как ангидрит). Заполнение минералами и последующие разрушения в течение естественного погружения территории может уничтожить большую часть первоначальной каверновой пористости и значительно ухудшить фильтрационно-емкостные свойства коллектора. По этой

причине, на стадии проектирования разведочного и эксплуатационного бурения необходимо уделять внимание закономерностям размещения палеокарстовых систем, при их наличии, делать оценку их влияния на коллекторские свойства и, в дальнейшем, учитывать полученную информацию. Уплотнение и разрушение породы в течение естественного погружения территории и заполнение твердыми минералами может уничтожить большую часть первоначальной каверновой пористости и значительно ухудшить фильтрационно-емкостные свойства карбонатного коллектора палеокарстового типа. Таким образом, палеокарстовые системы могут быть решающим фактором, в развитии неоднородности и расчлененности карбонатного коллектора. По этой причине, на стадии проектирования разведочного и эксплуатационного бурения необходимо уделять внимание закономерностям размещения палеокарстовых систем, делать оценку их влияния на коллекторские свойства и учитывать полученную информацию. Авторами разработана методика определения зон развития палеокарстовых структур и их оценки, основанная на комплексном использовании данных ГИС, керн и сейсмических исследований. В ходе исследований выявлено, что палеокарстовые структуры, с заполненным ангидритом поровым пространством имеют типовые отклики для различных методов ГИС, акустическая жесткость породы в местах их развития, как правило, превышает 15000 м/сек. Рекомендуется использовать предложенную методику для работы с палеокарстовыми структурами. Полученные результаты данных исследований рекомендуется учесть при дальнейшем бурении в пределах изучаемого участка.

Abstract. Paleokarst structure systems are the result of karsting, further sediments compaction and diagenesis processes. Such systems can form an important type of carbonate reservoir, having sufficiently large pore space (cavities, additional collapse cracks), but at the same time, can be a significant factor contributing to the heterogeneity and carbonate reservoir compartmentalization. The most important reason of this is the pores and cracks filling by solid miner-

als (such as anhydrite). Filling by minerals and further collapse during burial of area can destroy most of the initial cavern porosity and significantly impair reservoir quality. For this reason, at the design stage of exploration and development drilling it is necessary to pay attention to patterns of paleokarst systems spatial distribution, to make an assessment of their impact on reservoir properties and take into account the information received. Compaction, further destruction of the rock during burial processes and fractures filling by solid minerals can destroy most of the original cavern porosity and significantly impair reservoir properties of carbonate paleokarst reservoir. Thus, such paleokarst systems can be a most important factor in the development of heterogeneity and compartmentalization of reservoir. For this reason, at the design stage of exploration and development drilling, it is necessary to pay attention to the patterns of distribution paleokarst systems, make an assessment of their impact on reservoir properties. The authors propose an approach of identification the paleokarst development zones, based on the integrated use of well-log data, core and seismic surveys. During the research has been found that paleokarst structure with filled by anhydrite pore space have typical responses of different well-log methods, acoustic impedance in the paleokarst zones, usually, is more than 15 000 m/sec. It is recommended to use the proposed approach for paleokarst reservoir analysis. The obtained results of this research are recommended to take into account in the further drilling within Schelyayur oil field.

Ключевые слова: палеокарст, ангидрит, акустический импеданс, сейсмика, ГИС, керн.

Key words: paleokarst, anhydrite, acoustic impedance, seismic, well-log, core.

Введение

Карстовые системы активно развиваются на поверхности карбонатных платформ или островах, всякий раз, когда те частично или полностью выходят в субаэральные жаркие и сухие условия на долгий период времени. Площадь поверхностей обнажения контролируется эвстатическим или тектоническим изменением уровня моря в ходе геологической истории. Как результат, в карстовых регионах на больших площадях развиваются связанные системы каверн, имеющих значительные пустотные объемы. Палеокарстовые системы, по сути, соответствуют своим современным аналогам, но в процессе геологической истории значительно усложняют свое строение за счет механического уплотнения и процессов диагенеза [1].

Определение и характеристика палеокарстовых структур сегодня является определенным вызовом для нефтегазопромысловых геологов и геофизиков, так как теоретическая база по изучению таких явлений очевидно недостаточна. Несколько примеров современных карстовых условий описаны на основе полевых работ на обнажениях. В то же время подземные палеокарстовые структуры, важные для определения изменения уровня моря и характеристики качества коллектора, до сих пор остаются слабоизученными из-за недостаточности данных и необходимых технологий. Петрофизические данные позволяют оценивать палеокарстовые структуры лишь на изученных бурением участках, что недостаточно для прогнозирования развития таких зон на площадях, лишь предполагаемых к бурению. Сейсмические исследования и анализ геометрических сейсмических атрибутов позволяет отследить распространение палеокарстовых структур в трехмерном пространстве, однако традиционного амплитудного формата сейсмических данных может быть недостаточно для характеристики структур больших размеров.

В статье приводится описание метода, включающего в себя комплексное использование сейсмической инверсии, геометрических атрибутов, анализа керн и геофизических исследований скважин, который позволяет

выделять палеокарстовые системы, оценивать их влияние на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС), оконтуривать участки с ухудшенными коллекторскими зонами. Опробование выбранной методики производилось на участке, который находится на территории Тимано-Печорской нефтегазодобывающей провинции.

Геологическое строение

Исследуемый участок расположен на территории Ижемского района республики Коми, в 10 км к юго-западу от поселка Щельяюр. С точки зрения нефтегазодобывающей способности участок расположен в пределах Тобышско-Неритского нефтегазодобывающего района Ижма-Печорской нефтегазодобывающей области (рисунк 1) [2].

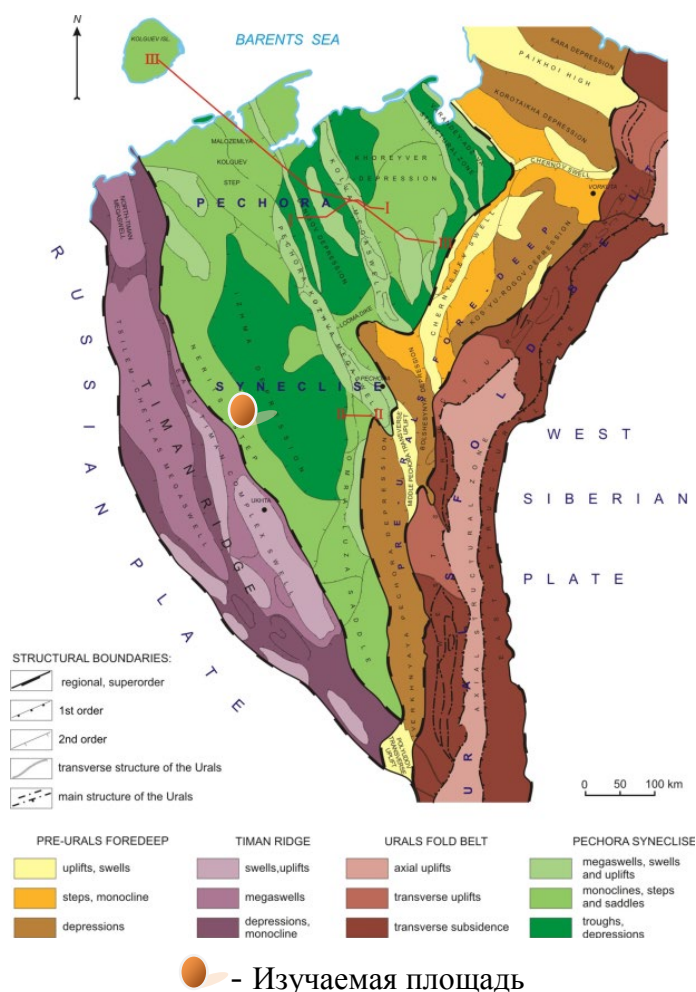


Рисунок 1. Схема тектонического районирования Тимано-Печорской нефтегазодобывающей провинции (Дедеев, 1989)

Перспективным является доманиково-турнейский нефтегазоносный комплекс. Продуктивные пласты Франского возраста D_3f в пределах участка залегают на глубинах 1900-2150 метров и сложены биогермными известняками в доманиковых отложениях D_3dm и переслаиванием известняков, доломитов и аргиллитов в отложениях сирачойского возраста D_3src [3].

В Верхнем Девоне изучаемая территория в большей степени представляла собой зону мелководного шельфа, в северо-западной части проходила линия склона, разделяющая в то время всю Тимано-Печорскую провинцию на глубоководную и мелководную зону, на бровках которого активно формировались рифовые постройки [4]. В Верхнедевонский период геологической истории в пределах территории происходила частая флуктуация моря, мелководная морская обстановка в процессе регрессии сменялась на субаэральные условия, что предполагает возможность протекания процессов карстования.

Постановка проблемы

В ходе интерпретации сейсмических данных, были обнаружены многочисленные структуры кольцевой формы в верхнедевонском интервале (рисунок 2) [5], на временном разрезе которые выглядят как частые малоамплитудные разломы (рисунок 3). Подобные структуры установлены на изучаемой площади, а также выявлялись по единичным 2D профилям на смежных площадях, и до сих пор изучены не были, что увеличивает практическую значимость проведенных исследований. Данные структуры развиты, преимущественно, в верхнефранской части разреза и наиболее интенсивно проявляются в разрезе сирачойского горизонта, часто прослеживаются в верхней части Доманика и обычно затухают в низах Евланово-Ливенских отложений.

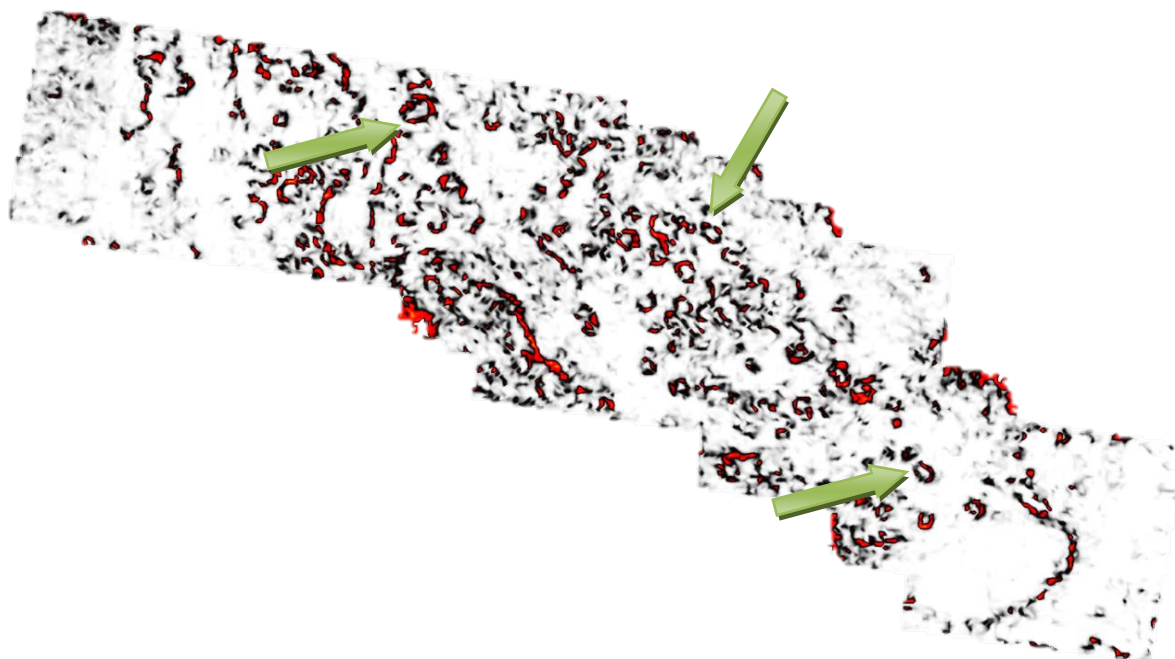


Рисунок 2. Поверхность атрибута вариативности, рассчитанная для Доманиковского горизонта (стрелки указывают на кольцевые структуры)

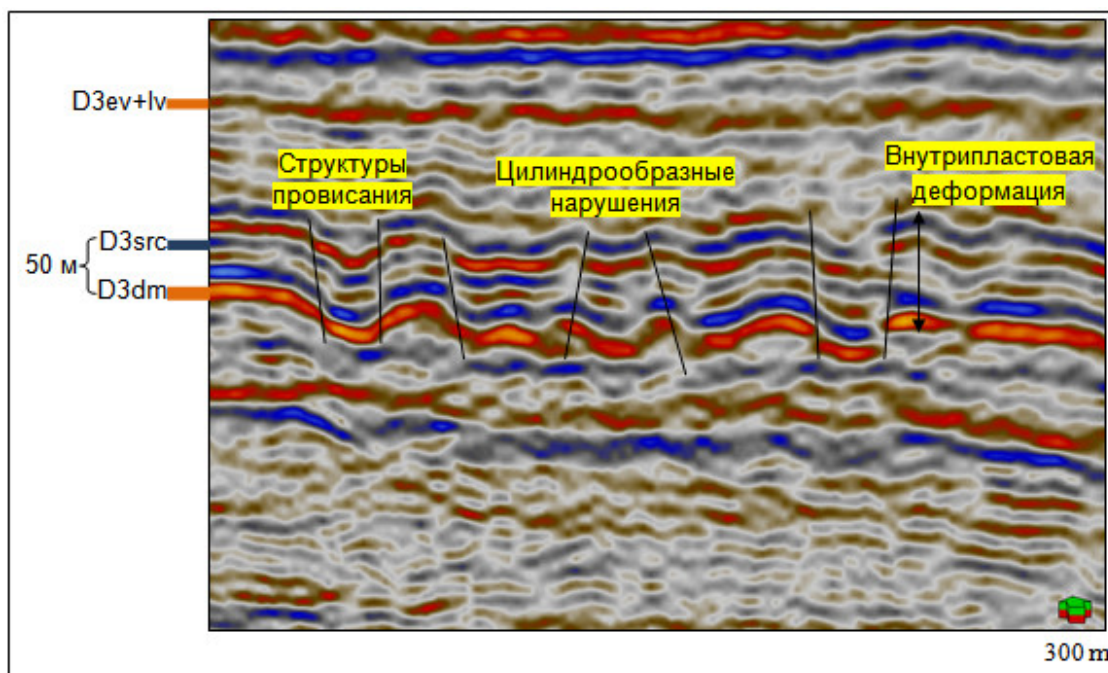


Рисунок 3. Фрагмент временного разреза Верхнедевонского интервала Xline 2502

Выделенные в продуктивном верхнедевонском интервале кольцевые формы и структуры проседания, свидетельствуют о том, что в пределах участка в большом количестве представлены системы палеокарстовых структур, образовавшиеся под влиянием геологических процессов (эвстатические колебания, уплотнение, диагенезис, и т. д.).

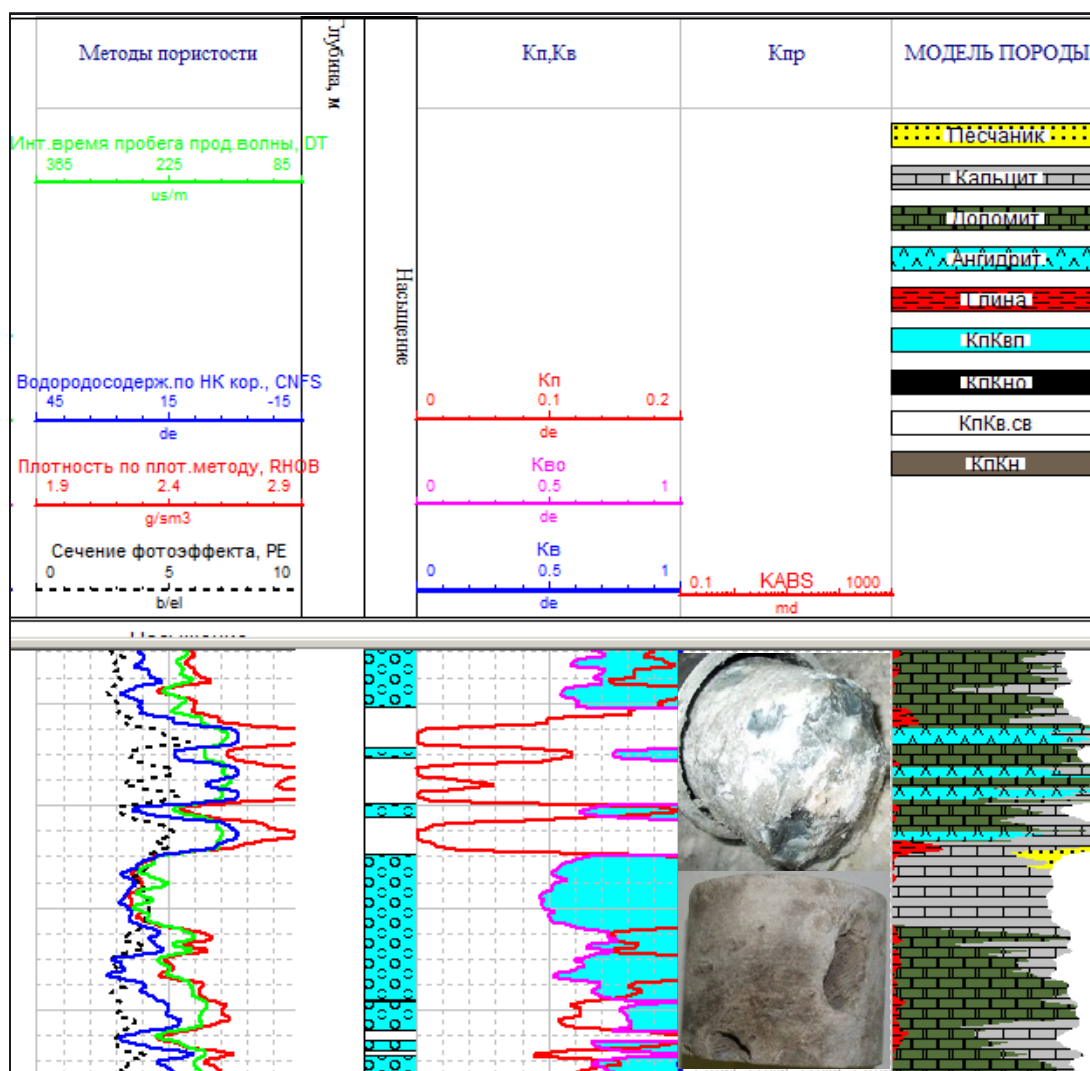


Рисунок 4. Образец ГИС (скв. 24г) из палеокарстового интервала с включениями ангидрита

Анализ кернового материала, данных ГИС, а также крайне неоднородная продуктивность пробуренных в пределах участка скважин дает косвенное основание полагать, что палеокарстовые структуры носят отрицательный характер там, где они развиты. Вероятно, заполняя трещины твердыми минералами, сводят проницаемость к нулю (рисунок 4) и сокращают поровое пространство, как совокупность и особенности латерального распространения создают некий гидродинамический экран между смежными ловушками, тем самым, препятствуя миграции УВ и их заполнению, приводя к отрицательным результатам бурения. Также, рассматриваемая система структур заслуживает внимания с точки зрения выявления и прослеживания органогенных построек и может служить индикатором при вос-

становлении обстановок осадконакопления, нести информацию о процессах происходивших в тот или иной этап геологической истории. Подобный анализ выполняется впервые для площади в Тимано-Печорской нефтегазонадной провинции, и может быть использован в дальнейшем как комплексный подход для работы с подобными структурами. Авторами был подобран алгоритм действий, выполнение которых позволит выделить палеокарстовые системы, оценить их размеры, количество и степень влияния на коллекторские свойства, и сделать прогноз ФЕС в пределах участков, неизученных бурением. Данный алгоритм был составлен путем комплексного использования существующих на сегодня традиционных технологий интерпретации геолого-геофизических данных.

Данные и методология

В основе анализа были использованы сейсмические исследования, которые были выполнены в пределах изучаемого участка, площадью около 266 м². Используемые сейсмические объемы состоят из 3D сейсмического куба после суммирования, а также несколько рассчитанных кубов сейсмических атрибутов, таких как куб вариативности и куб когерентности [6]. Для Верхнедевонского нефтенасыщенного интервала около 25 метров керн были доступны из скважины, пробуренной на данный интервал с точкой входа в пласт, предположительно в пределах палеокарстовой структуры. Описание керна и петрофизический анализ были доступны для всех скважин, пробуренных на данном участке (11 скважин, одна из которых предположительно затрагивает область развития палеокарстовых структур). Также были проанализированы данные различных методов ГИС, включающих ГК, ГГКп, нейтронную пористость, акустический каротаж, кавернометрию и кривые электрического сопротивления пород. Из негативных факторов при выполнении данных исследования можно отметить отсутствие опубликованных в открытом доступе результатов детальных исследований аналогичных палеокарстовых структур, а также недостаточность по-

левых геологических исследований поверхностных карстовых структур Верхнедевонского возраста.

Первый шаг в комплексном подходе состоял из определения текстуры породы и петрофизических особенностей палеокарстовых зон (выделение типовых откликов ГИС), используя данные по немногочисленным аналогам и доступный керновый материал.

После этого в ходе традиционной интерпретации сейсмических данных были построены карты кровли подошвы всех горизонтов Верхнедевонского интервала по всей площади исходного 3D сейсмическом куба для того чтобы проследить масштабы распространения палеокарстовых структур в вертикальной проекции. Привязка сейсмических отражений по отчетным профилям к разрезу скважины выполнялась по стандартному для данной процедуры алгоритму. Входными данными являлись значения акустического каротажа и вертикального сейсмического профилирования. Привязав скважинные данные к сейсмическим, выполнялась корреляция отражающих горизонтов в масштабе 1:50000.

После традиционной интерпретации, исходный сейсмический куб был пересчитан из амплитудного формата в формат акустического импеданса с помощью инверсионного преобразования [7]. В сравнении с традиционной интерпретацией сейсмических данных, сейсмическая инверсия может переводить данные сейсмических отражений в качественные характеристики породы. При сравнении с данными классического сейсмического отражения, акустический импеданс после суммирования, широко используемый подход сейсмической инверсии. Он представляет собой более детальный и точный взгляд на литологию и свойства пористости коллектора на умеренно увеличенном разрешении за счет удаления эффекта импульса источника. Для расчета акустической жесткости пространства и определения трехмерного пространственного распространения палеокарстовых систем был применен метод инверсии основанный на реальной модели (model-based). При использовании этого метода, геологическая модель строится один раз

и в дальнейшем она многократно обновляется для того чтобы максимально соответствовать реальным сейсмическим данным.

Математически, вышеизложенный метод может быть изображен как:

$$F(M) = F(M_0) + (\partial F(M_0) / \partial M) * \Delta M$$

где: M_0 – это изначальная геологическая модель, M – реальная модели земли, $F(M_0)$ рассчитанные значения из изначальной геологической модели, $F(M)$ – наблюдаемые значения, ΔM – изменения в параметрах модели, $\partial F(M_0) / \partial M$ изменение в рассчитанных значениях. Ошибка между наблюдением и рассчитанными значениями может быть представлена в виде уравнения матрицы:

$$\Delta F = A \Delta M$$

где: A – это матрица производных с n -строками и k -столбцами.

Начальная геологическая модель строится по данным ГИС и интерпретированным горизонтам в ходе первой итерации сейсмической интерпретации. Таким образом, финальный результат такой инверсии связывает между собой скважинные и сейсмические данные.

Для структурных поверхностей доманиковского и сирачойского горизонтов также были рассчитаны поверхности атрибутов вариантности и когерентности {2}. Геометрические сейсмические атрибуты, позволили оконтурить крупномасштабные палеокарстовые структуры с нарушенной сплошностью отражающих горизонтов на всей территории исследуемого участка (рисунок 2). В отличие от инверсии, геометрические атрибуты рассчитываются из сравнения геометрических свойств целевой трассы с ближайшими соседними трассами. Анализ геометрических сейсмических атрибутов – это независимый и мощный инструмент для количественной и качественной характеристики геологических структур (таких как палеокарст, трещины и тектонические нарушения) в обломочных и карбонатных коллекторах. Он является отдельной частью большинства работ связанных с интерпретацией сейсмических данных. Размер палеокарстовых структур и разрешение геометрических атрибутов зависит от разрешения сейсмиче-

ских данных и акустического контраста между палеокарстовыми структурами и окружающей породой, а также в определенной степени зависит от использованного метода инверсии.

Как упомянуто выше, Верхнедевонские отложения в пределах изучаемой площади залегают на глубинах от 1900 до 2150 метров. Полученная из сейсмических данных центральная частота варьирует в пределах 52-57 Гц с полезным высокочастотным контентом вплоть до 75 Гц, что имеет большое значение и позволяет получить высокое разрешение в дальнейшей работе. По результатам изучения кернового материала и петрофизических данных, выделенный в одной скважине палеокарстовый интервал имеет мощность 20 метров. Предполагая среднюю скорость волны в нем около 6,5 км/с (ГИС) и частоту сейсмических данных в 55 Гц, средняя длина волны, таким образом, составит 115 метров. Теоретическое сейсмическое разрешение для Верхнедевонских отложений, предполагая, что лимит сейсмического разрешения около 1/8 от преобладающей длины волны, при благоприятных условиях составит 14 метров. При толщине палеокарстовых интервалов около 20 метров, согласно петрофизическим и ГИС данным, они должны быть распознаваемы на сейсмике. Разрешение геометрических сейсмических атрибутов соответственно такое же, как и разрешение использованных сейсмических данных.

Результаты

Поровое пространство, относящиеся к палеокарстовым структурам включает каверновые поры, межзернистую пористость, а также трещины и брекчии. За исключением нескольких открытых трещин со следами нефти остальная часть порового пространства заполнена ангидритом. Четкая петрофизическая разница между палеокарстовыми зонами и не палеокарстовыми зонами, выявленная с помощью ГИС, позволяет нам использовать сейсмическую инверсию для того, чтобы оконтуривать латеральное и вер-

тикальное распространение палеокарстовых зон в пределах изучаемой площади.

Анализ данных ГИС показал, что палеокарстовые зоны в пределах изучаемого участка имеют аномально высокие скорости, значения ГГКп и сопротивления, а также низкую нейтронную пористость в сравнении с непалеокарстовыми зонами. Средняя нейтронная пористость в палеокарстовых зонах меньше чем 2%, в то время как в непалеокарстовых зонах она варьирует в пределах от 4 до 25%. Средняя скорость и ГГКп выше, чем 6,1 км/сек и 2,59 г/см³ соответственно, для палеокарстовых зон данные параметры были измерены непосредственно на образцах керна. Значения ГГКп для непалеокарстовых зон меньше чем 2,59 г/см³. График зависимости значений ГГКп и акустического каротажа для интервала, освещенного керновым материалом, представлен на рисунке 5, синие точки на нем соответствуют зонам развития палеокарстовых структур, и соответственно не обладают коллекторскими свойствами. Значение акустического импеданса в зонах развития палеокарстовых структур превышает 15255 м/сек, зоны в которых акустический импеданс превышает данное значение, на модели акустического импеданса выделяются как палеокарстовые зоны с пониженными значениями ФЕС, и соответственно исключаются из перспективных участков для поискового бурения (рисунок 6).

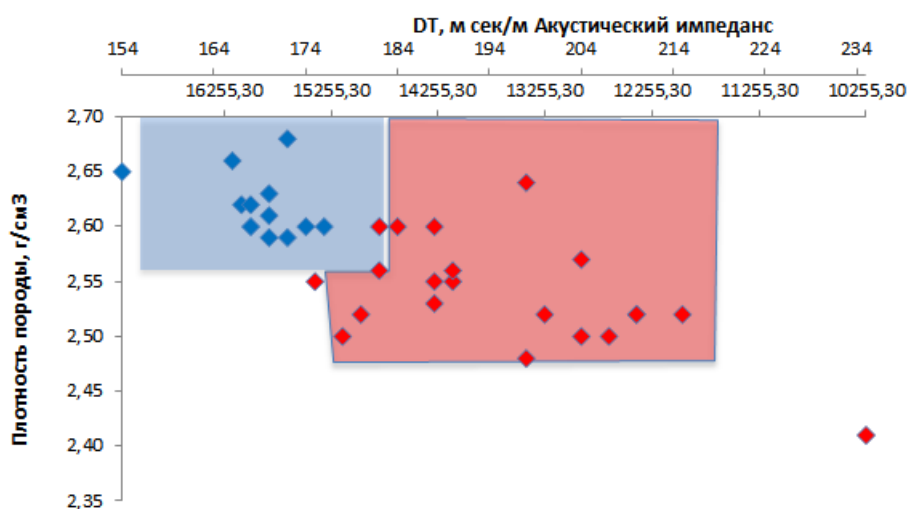


Рисунок 5. График зависимости значений ГГКп и акустического каротажа (скв. 24г)

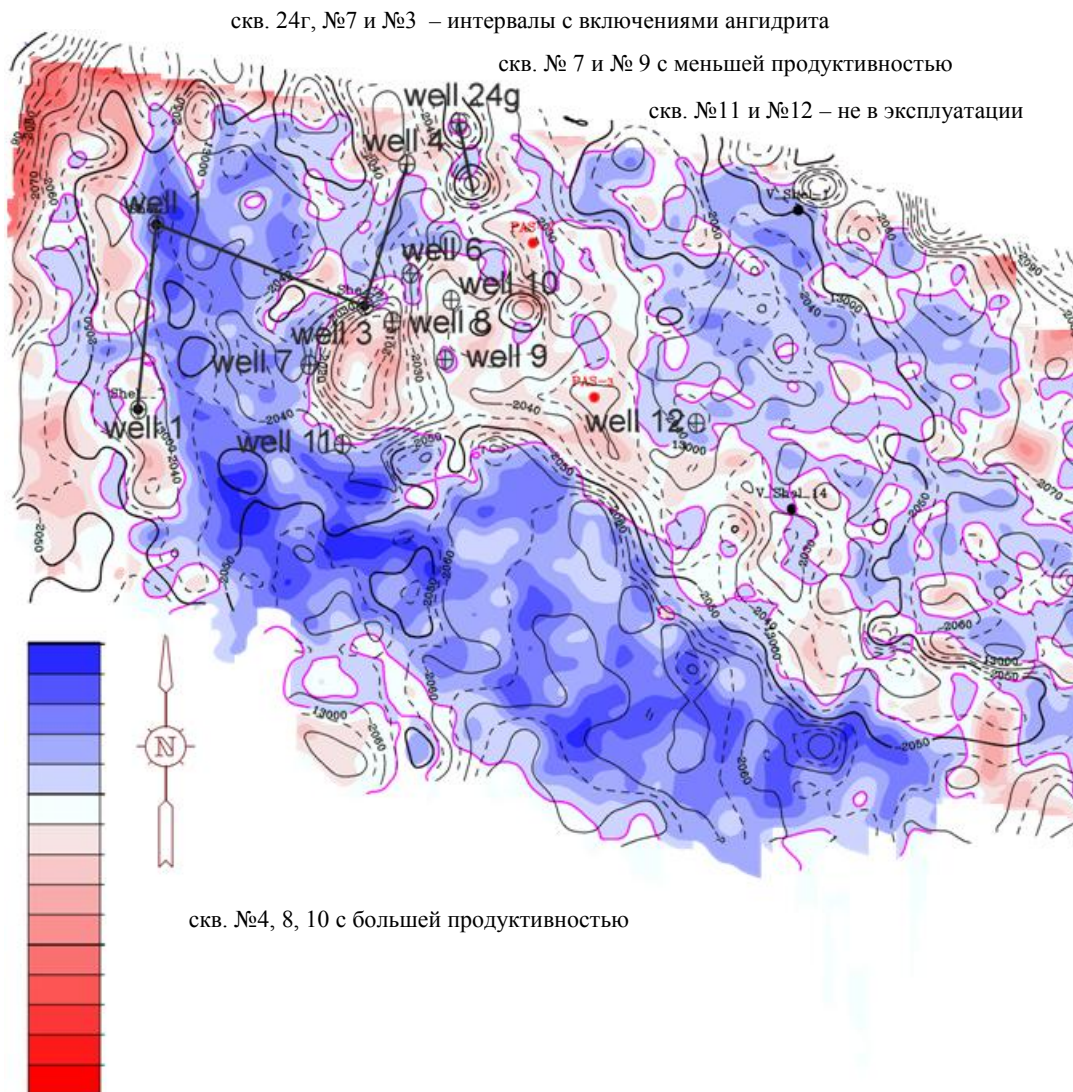


Рисунок 6. Карты средних значений акустического импеданса в верхнедоманиковых и нижнедоманиковых отложениях

Интенсивное послекарстовое заполнение ангидритом значительно сокращает первичную и вторичную, связанную с карстованием, пористость, а также нарушает гидродинамическую связь внутри коллектора. Анализ керна показывает среднюю пористость и проницаемость в палеокарстовых зонах меньше чем 2% и 1 мД соответственно. Эти условия отвечают карстовым зонам с отсутствием коллекторских свойств. Для потенциального коллектора, как известно, пористость и проницаемость должны быть выше, чем 10% и 30 мД.

Выводы

В работе предложен опыт использования комплексного метода для выделения палеокарстовых систем за счет комбинирования анализа керна и ГИС, сейсмической инверсии и трехмерных геометрических атрибутов. Этот метод позволяет нам определять распространение разрушенных палеокарстовых систем в трехмерном пространстве, в пределах изучаемого участка, а также определить их влияние на расчлененность карбонатных коллекторов.

Мелкомасштабные палеокарстовые системы с отсутствием коллекторских свойств, развитые на изучаемом участке, демонстрируют высокий акустический импеданс за счет высокого содержания ангидрита в сравнении с непалеокарстовыми зонами, которые имеют более-менее однородную пористость. Для исследуемого района результаты сейсмической инверсии акустического импеданса и интерпретации данных ГИС, использованные для картирования палеокарстовых систем, по сути, являются отображением содержания ангидрита в породе. Примененный метод сейсмической инверсии, показал себя как полезный инструмент для характеристики вертикального и латерального распространения мелкомасштабных палеокарстовых систем. Для крупномасштабных палеокарстовых систем, оптимальным инструментом является анализ геометрических сейсмических атрибутов.

Список используемых источников

1 Развитие палеокарстовых структур в отложениях Сан Андрес, Пермский бассейн, выявленных сейсмической характеристикой / Доу К. [и др.] // Журнал прикладной геофизики. 2011. №75. С. 379-389.

2 Dedeev, V. A., Yudin, V.V. et al. 1985. Tectonic map of Pechora Plate (Preprints of 'Scientific Papers' Komi USSR AS Branch; Issue 142).

3 Чупров В.С. Сейсмостратиграфия палеозойских отложений Ижемской впадины в связи с нефтегазоносностью: дис.... канд. геол.-минерал. наук. Сыктывкар, 2002.

4 Пармузина Л.В., Богданов Б.П., Малышев Н.А. Верхнедевонские органогенные постройки и их размещение в центральной части Хорейверской впадины. Тектоника северо-востока Европейской платформы. Сыктывкар, 1988. С. 73–82.

5 Азведо Л., Перейра Г. К. Сейсмические атрибуты для характеристики нефтяных залежей. Университет Авейро, 2009. С. 93-96.

6 Chopra, S., Marfurt, K.J., 2008. Emerging and future trends in seismic attributes. *The Leading Edge* 27 (3), 298–319.

7 Nissen, S.E., Sullivan, E.C., Givens, N.B., 2005. Improving geological and engineering models of mid-continent fracture and karst-modified reservoir using 3-d seismic attributes. DOE semiannual scientific/technical report, pp. 23–24.

References

1 Razvitie paleokarstovyh struktur v otlozhenijah San Andres, Permskij bassejn, vyjavlennyh sejsmicheskoi harakteristikoi / K. Dou [I dr.] // *Zhurnal prikladnoj geofiziki*. 2011. №75. S. 379-389. [in Russian].

2 Dedeev, V. A., Yudin, V.V. et al. 1985. Tectonic map of Pechora Plate (Preprints of 'Scientific Papers' Komi USSR AS Branch; Issue 142).

3 Chuprov V.S. Sejsmostratigrafija paleozojskih otlozhenij Izhemskoj vpadiny v svjazi s neftegazonosnost'ju. Syktyvkar, 2002./ Dis.... Kand. geologo-mineralogicheskikh nauk. [in Russian].

4 Parmuzina L.V., Bogdanov B.P., Malyshev N.A. Verhnedevonskie organogennye postrojki i ih razmeshhenie v central'noj chasti Horejverskoj vpadiny. Tektonika severo-vostoka Evropejskoj platformy. Syktyvkar, 1988. S. 73–82. [in Russian].

5 Azvedo L. Seismicheskie atributy dlja harakteristiki neftjanyh zalezhej / L. Azvedo, G. K. Perejra. Universitet Avejro, 2009. S. 93-96.

6 Chopra, S., Marfurt, K.J., 2008. Emerging and future trends in seismic attributes. *The Leading Edge* 27 (3), 298–319.

7 Nissen, S.E., Sullivan, E.C., Givens, N.B., 2005. Improving geological and engineering models of mid-continent fracture and karst-modified reservoir using 3-d seismic attributes. DOE semiannual scientific/technical report, pp. 23–24.

Сведения об авторах

About the authors

Скворцов А. А., аспирант кафедры «Геология горючих и твердых полезных ископаемых», ФГБОУ ВПО УГТУ, г. Ухта, Российская Федерация

A. A. Skvortsov, Post-graduate Student of the Chair “Geology and Solid Combustible Minerals”, FSBEI HPE Ukhta State Technical University, Ukhta, the Russian Federation

e-mail: mailanton@mail.ru

Кулешов В. Е., канд. техн. наук, доцент кафедры «Геология горючих и твердых полезных ископаемых», ФГБОУ ВПО УГТУ, г. Ухта, Российская Федерация

V. E. Kuleshov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair “Geology and Solid Combustible Minerals”, FSBEI HPE Ukhta State Technical University, Ukhta, the Russian Federation

e-mail: vkuleshov@ugtu.net