

УДК 550.834.05+553.982

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ НТИ АНИЗОТРОПИИ С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТОВ ПОЛНОАЗИМУТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ И РАСШИРЕННОГО КОМПЛЕКСА ГИС НА ПРИМЕРЕ ФАМЕНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГОМАШЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.С. Душин^{1,2}, А.Н. Любочкин¹, И.С. Кривошеков¹, А.Н. Иноземцев³

¹ ООО «РН-БашНИПИнефть», 450006, Уфа, ул. Ленина, 86/1, Россия

²ФГБОУ ВО «УГНТУ», 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Россия

³ООО «Роксар Парадайм — ПО и Решения», 115054, Москва, ул. Дубининская, 53, стр. 5, Россия

Показано решение задачи поиска кавернозно-трещиноватых зон, а также зон, определяющих неоднородность резервуара в фаменских отложениях одного из лицензионных участков Республики Башкортостан. В статье описывается применение комплексного подхода при исследовании азимутальной горизонтально-поперечной изотропии горных пород с помощью скважинных данных и современных методов обработки данных площадной сейсморазведки для карбонатных отложений, связанных с развитием органогенных построек. Описаны результаты применения технологии полноазимутальной угловой миграции.

Внедрение на участке исследований высокотехнологичных подходов с помощью полноазимутальной обработки данных сейсморазведки, спектральной декомпозиции, AVA/AVAZ инверсии и комплексного анализа динамических свойств волнового поля в совокупности с данными ГИС и керна позволило выделить искаженные зоны карбонатного коллектора, связанные с изменением характеристик скелета горной породы, наличием пустотного пространства пористо-кавернозно-трещинного типа и зон литологического замещения, а также вторичных процессов, тем самым снизив риски, связанные с последующим эксплуатационным бурением.

Органогенные постройки, фацальная неоднородность, карбонатные породы, полноазимутальная угловая миграция, горизонтальная поперечная (HTI) анизотропия, акустический сканер, дифракционная и рассеянная компоненты, трещиноватость, кавернозность

HORIZONTAL TRANSVERSE ISOTROPY STUDIED USING TOOLS FOR FULL-AZIMUTH SEISMIC DATA PROCESSING AND AN ADVANCED WELL LOGGING COMPLEX ON THE EXAMPLE OF FAMENNIAN DEPOSITS OF THE YUGOMASHEVSKOYE FIELD

A.S. Dushin, A.N. Lyubochko, I.S. Krivoshchekov, A.N. Inozemtsev

This paper presents a solution to the problem of searching for cavernous fractured zones and the zones that determine reservoir heterogeneity in Famennian deposits of one of the licensed sections of the Republic of Bashkortostan. The use of an integrated approach to the study of azimuthal horizontal-transverse isotropy of rocks using wellbore data and modern methods for processing areal seismic data for carbonate deposits associated with the development of organogenic structures is described. The results of using the full-azimuth angular migration technology are obtained. The introduction of high-tech approaches at the research site using full-azimuth seismic data processing, spectral decomposition, AVA/AVAZ inversion, and complex analysis of dynamic properties of the wave field in conjunction with well logging and core data makes it possible to identify the distorted zones of the carbonate reservoir associated with changes in the characteristics of the rock skeleton, the presence of a porous-cavernous-fracture void space and lithological replacement zones, as well as secondary processes, thereby reducing the risks associated with subsequent production drilling.

Organogenic structures, facies heterogeneity, carbonate rocks, full-azimuth angular migration, HTI anisotropy, acoustic scanner, diffraction and scattered components, fracturing, cavernousness

ВВЕДЕНИЕ

Объектом изучения являются органогенные постройки фаменского возраста, сложенные карбонатными породами, зачастую подверженные высокой степени вторичных изменений, включающих кавернозность, трещиноватость и сульфатизацию [Бурикова и др., 2018; Вилесов, Чертина, 2020]. Это проявляется в высокой степени расчлененности коллектора и изменчивости фильтрационно-емкостных свойств и неоднородности резервуара.

Данные особенности геологического строения напрямую влияют на эксплуатационные характеристики скважин, вскрывающих такие объекты, что является осложняющим фактором при разработке. Определение трещиноватой и кавернозной составляющих для коллекторов, связанных с органогенными постройками, является важным аспектом в условиях высокой изменчивости минерального состава и пустотного пространства пород.

В последние годы наряду с внедрением отдельных методик все большее внимание уделяется комплексированию, использованию и анализу разномасштабных данных при изучении анизотропии, которое позволяет лучше оценить объект [Душин и др., 2016; Minigalieva et al., 2018; Чернышов и др., 2022]. Сюда относятся как исследования керна, включающие стандартные и специальные эксперименты, так и данные каротажа, в том числе ядерно-магнитный каротаж, широкополосный акустический каротаж, микроимиджеры.

Для изучения и анализа анизотропии на базе керновых данных и ГИС была рассчитана объемная минералогическая модель, а также проведен комплексный анализ геофизических исследований скважин (ГИС) и керна. На площади исследована азимутальная направленность скважины по данным скважинного акустического сканера (САС-90) [Терехов и др., 2012], выполнена полноазимутальная угловая миграция EarthStudy360® (ES360), AVAZ инверсия (изменения скоростей в зависимости от азимута (Velocity Variation with Azimuth)) [Koren, Ravve, 2011a, 2011b], <http://roxar.ru/portfolio/earthstudy-360/>.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В региональном плане изучаемая территория, расположенная в северной части Республики Башкортостан, в позднефранское и раннесреднефаменское время относилась к краевой части мелководного шельфа, где происходил активный рост органогенных построек с их постепенной миграцией с юго-востока на северо-запад (в область относительно погруженного глубоководного шельфа). В позднефаменское время отложения формировались в условиях мелководного шельфа. Целевые отложения верхнефранского подъяруса и фаменского яруса представляют собой органогенные постройки и межрифовые осадки, в которых содержатся запасы нефти. Породы представлены известняком (около 75 %) и доломитом (около 20 %), в отдельных интервалах присутствуют ангидритовые разности и аргиллиты. Зернистые грейн-пакстоуны с высокой долей микробиальных отложений (в виде прослоев) и низкой долей доломитизации слагают верхнюю часть исследуемого интервала (елецкий горизонт). В нижней части целевого интервала отложения в основном представлены сферово-водорослевыми доломитизированными и доломитовыми разностями (задонский горизонт).

Коллекторы представлены переслаиванием кавернозно-поровых и порово-кавернозно-трещинных прослоев, развивающихся в известково-доломитовой толще, обладают высокой неоднородностью как по разрезу, так и по территории. Данные испытаний и опробования скважин также подтверждают высокую латеральную неоднородность — дебиты жидкости и коэффициенты продуктивности отличаются на несколько порядков.

МЕТОДИКА

Для изучения распространения высокопродуктивных зон в 2018—2020 гг. был выполнен комплекс керновых и скважинных (акустический сканер), а также сейсмических (полноазимутальная миграция по общему углу отражения) исследований.

В ходе работы был проведен подробный седиментологический анализ, выделена фациальная неоднородность, сделана оценка вторичных преобразований, увязка полученной информации с результатами динамического атрибутного анализа сейсмических данных.

Подход к изучению азимутальной горизонтально-поперечной изотропии горных пород (ГПИ (HTI) анизотропии) и выделения возможных зон трещиноватости и кавернозности или зон замещения был проведен совместно с комплексом камеральных работ, включающим в себя выполнение полноазимутальной угловой миграции, кинематического VVAZ (изменения скоростей в зависимости от азимута) и динамического AVAZ анализов, последующее сравнение полученных результатов с данными сканера САС-90 [Терехов и др., 2012], с данными интерпретации ГИС и керновых данных и априорной геологической информацией с целью выделения зон с повышенными значениями азимутальной анизотропии. Кроме того, была выполнена амплитудная AVAZ инверсия для расчета кубов и карт AVAZ параметров: анизотропный градиент, плотность трещин, интенсивность HTI анизотропии, связанная с изменением напряженности и трещиноватости пород, направление HTI оси симметрии.

Атрибутный анализ на площади был выполнен в рамках стандартного подхода с изучением распределения амплитуд, частот и их производных, исследования геометрических атрибутов, расчетом сейсмоклассов. В дальнейшем информация, полученная в ходе атрибутного анализа, участвовала в построении концептуальной седиментологической модели, геометризации объектов и выделении перспективных зон.

Азимутальная обработка сейсмических данных 3D по технологии полноазимутальной угловой миграции. Технология полноазимутальной угловой миграции в локальной угловой области появилась на рынке геофизических услуг в 2012 г. и была апробирована на многих участках [Koren, Ravve, 2011a, 2011b; Inozemtsev et al., 2013; Богатырев и др., 2017].

Компания ПАО «НК Роснефть» опробовала технологию полноазимутальной обработки и комплексной интерпретации сейсморазведочных данных с данными скважин на одном из своих проектов.

Наряду с основными задачами — определение интенсивности и направленности НТИ анизотропии — технология позволяет повысить качество сейсмических изображений: общую разрешенность прослеживаемости отражающих горизонтов и тектонических нарушений.

С помощью технологии полноазимутальной угловой миграции EarthStudy360® (ES360) можно исследовать освещенность точек среды и оценивать такие параметры, как соотношение зеркально-отраженной и рассеянной компонент, условия залегания, качество отражений, распределение скоростей и амплитуд и их азимутальную зависимость [Koren, Ravve, 2011a, 2011b]. Данная технология основана на полноазимутальном трассировании лучей из точек среды к поверхности с равномерным шагом их следования. Это обеспечивает равномерную освещенность объектов. На основе такого трассирования из точек среды к поверхности первичное волновое поле на поверхности преобразуется в локальной угловой области, ограниченной первой зоной Френеля, в волновое поле в зависимости от азимута и падения границы, а также углов раскрытия лучей и азимутов лучевых пар. В данной миграции мы получаем полноазимутальные дирекционные и рефлексионные сейсмограммы. В дирекционных содержатся данные о распределении энергии упругих волн, заданных пространственной ориентацией отражателя, в рефлексионных — информация о распределении энергии отраженных волн как функции угла падения и сопутствующих азимутов. Анализ двух компонент волнового поля (зеркально отраженной и рассеянной) позволяет обнаружить особенности, связанные с небольшими геологическими объектами. После разделения волнового поля на рефлексионную и дирекционную составляющие выполняется полноазимутальная миграция дирекционных и рефлексионных сейсмограмм и их раздельная обработка. На последнем этапе получают сейсмические изображения зеркальных отражений и дифракционных объектов, выполняют VVAZ/AVAZ инверсии и получают атрибуты НТИ анизотропии, разница значений остаточной кинематики вдоль и поперек оси НТИ симметрии (Delta Alpha); направление оси НТИ симметрии (Azimuth Slow) и значение остаточной кинематики вдоль направления оси симметрии (Alpha Slow) для прогноза мезотрещиноватости.

Технологической особенностью применения полноазимутальной угловой миграции является отсутствие необходимости применения 5D регуляризации и предварительного выбора азимутальных секторов для расчета, а также возможность разделения зеркальной и дифракционной компонент волнового поля как в процессе параметризации лучевой трассировки, так и на следующих этапах миграции и обработки мигрированных сейсмограмм обоих типов. Кроме того, в данной технологии реализована возможность учета реальных азимутальных сносов волнового поля при наклонных границах. Это обеспечивает в полноазимутальной угловой миграции более точную фокусировку амплитуд в рамках дифракционного суммирования. Основным минусом технологии являются крайне высокие ресурсные и временные затраты при ее выполнении [Hollander et al., 2012], которые могут быть сокращены с переходом на GPU процессоры.

Анализ лучевой трассировки показывает, что значение апертуры (круговая, 4000 м) обеспечивает получение информации как в первой зоне Френеля («зеркальная» компонента), так и за ее пределами («дифракционная» компонента). При этом увеличение апертуры способствует статистическому увеличению количества «успешных» лучей за пределами зоны Френеля, но на практике имеет смысл только при наличии границ с большими углами наклона и априорно широким спектром удалений сейсмических данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты обработки сейсмических данных. При сравнении угловой миграции и миграции по панелям удалений на уровне сейсмограмм отмечено практически полное отсутствие на рефлексионных сейсмограммах регулярных помех. На площади работ также ранее была выполнена временная обработка и анизотропная глубинная миграция, а также изотропная глубинная миграция до суммирования по алгоритму Кирхгофа с постмиграционной (до суммирования) постобработкой результатов миграции. После уточнения анизотропной глубинно-скоростной модели (ГСМ), была выполнена анизотропная миграция до суммирования, ее параметры ничем не отличаются от параметров изотропной миграции Кирхгофа.

При сопоставлении результатов полноазимутальной угловой миграции и изотропной миграции на уровне суммированных данных отмечается существенное уменьшение проявления как волн помех различного типа, так и уровня интенсивности миграционных артефактов.

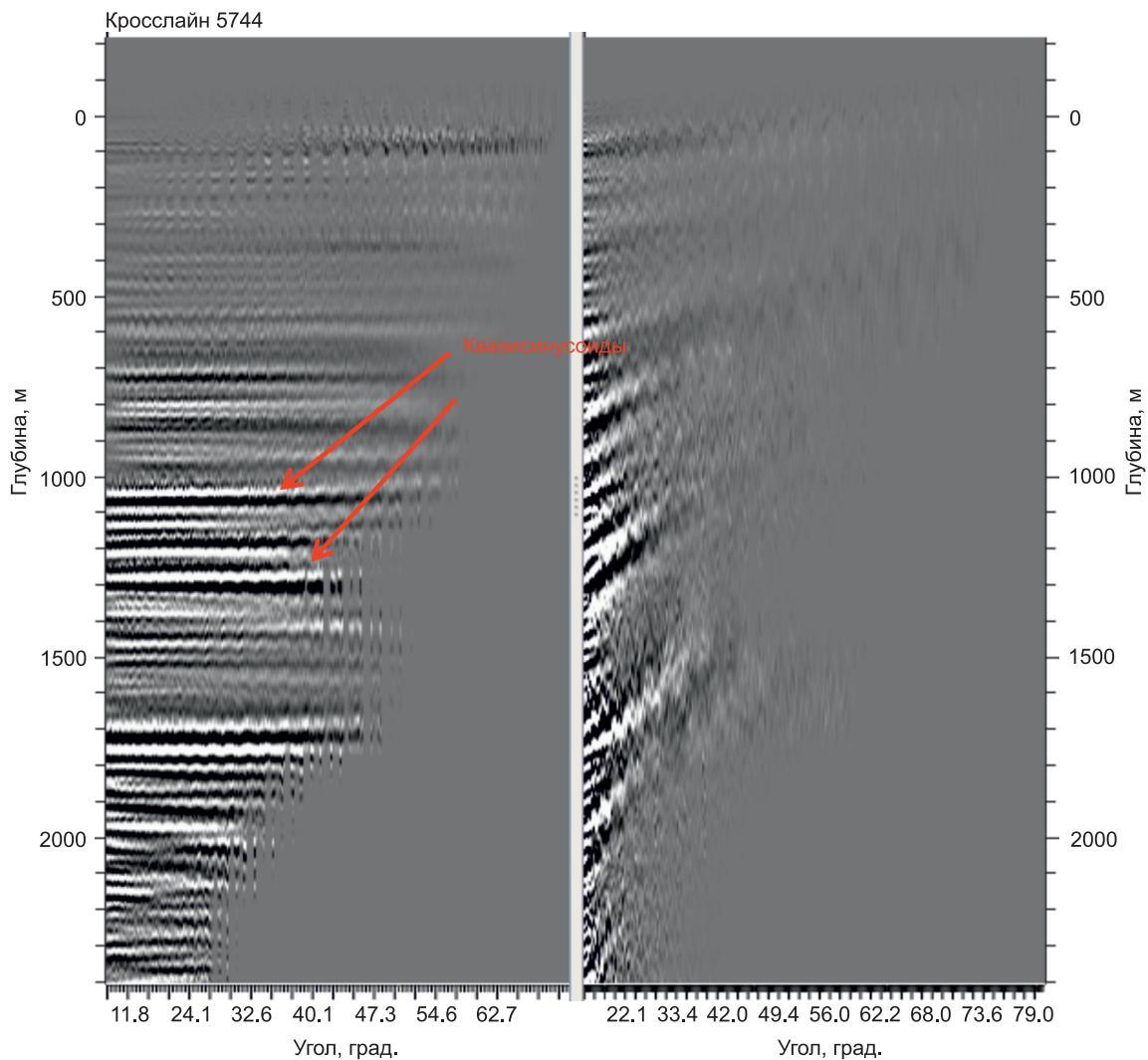


Рис. 1. Пример рефлексионных (слева) и дирекционных (справа) сейсмограмм.

Уже после получения рефлексионных сейсмограмм по сети профилей с моделью VTI (Vertical Transverse Isotropy) (параметры поперечной анизотропии) были рассчитаны эффективные параметры HTI анизотропии (на основе азимутального анализа угловых сейсмограмм). Полученным рефлексионным сейсмограммам характерны квазисинусоиды (VVAZ эффект), что указывает на наличие азимутально зависимых скоростных флюктуаций, связанных с направленной трещиноватостью (рис. 1). В свою очередь, процесс разделения волнового поля на зеркальную компоненту (отраженная волна) и рассеянную (дифрагированная волна) происходит при помощи сборки дирекционных сейсмограмм (рис. 2, а) и фильтрации зеркальной составляющей.

Одним из основных свойств дирекционных угловых сейсмограмм является отображение в волновом поле информации о дифракционной/рассеянной компоненте, энергией которой на порядок ниже энергии зеркальной компоненты. По данному энергетическому признаку эти компоненты были разделены. После подавления энергии зеркальной компоненты максимальное проявление дифракционной компоненты произошло на уровне суммированного куба (см. рис. 2).

Средне- и мелкомасштабные структурные детали и неоднородности среды, такие как сбросы, карсты, трещиноватость и т. д., играют ключевую роль в поисках и разработке нетрадиционных резервуаров нефти и газа. Они порождают дифрагированные волны (дуплексные и рассеянные), которые несут в себе информацию о неоднородных объектах [Khaidukov et al., 2004]. Использование таких волн для обнаружения, идентификации и характеристики мелкомасштабных неоднородностей весьма затруднено из-за слабой интенсивности дифракционной компоненты волнового поля и сильной интерференции с зеркальными отражениями, маскирующими дифракцию. Усиление дифракционной компоненты и ее вы-

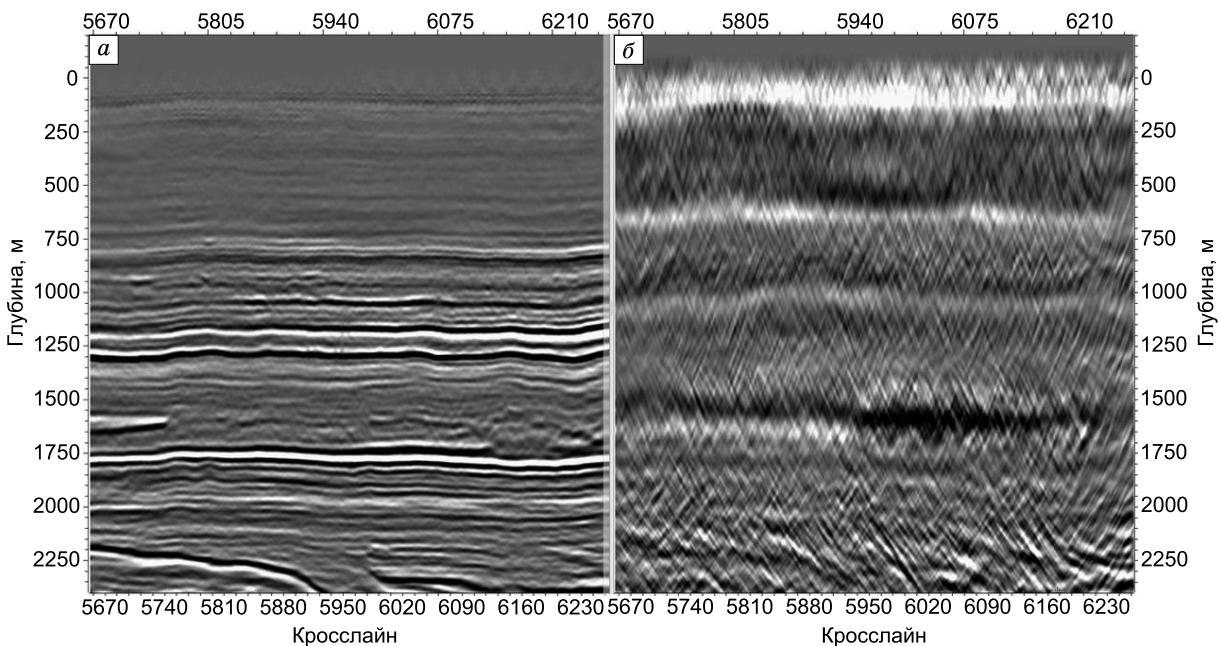


Рис. 2. Разделение дирекционной (а) и выделенной дифракционной (б) компонент.

деление из полного поля становится ключевой задачей при использовании дифракции для поиска и изучения мелкомасштабных элементов среды [Landa et al., 2008].

Для разделения волнового поля на зеркальную и рассеянную составляющие применяются дирекционные сейсмограммы. После фильтрации зеркальной компоненты и суммирования рассеянной компоненты был получен куб рассеянной компоненты. Наличие отражателей в поле рассеянной компоненты совпадает с плоскостями разрывных нарушений, полученными по кубу когерентности для венд-рифейских отложений. Для целевых отложений отражатели в поле рассеянной компоненты найдены не были (см. рис. 2, б).

Проведенная анизотропная миграция дала положительные результаты и в кинематической области интерпретации. Так, согласно визуальной и статистической оценке, после полноазимутальной угловой миграции относительно анизотропной миграции Кирхгофа:

- вырос уровень соотношения сигнал/шум примерно в 2.5 раза;
- более четко стали идентифицироваться разломы фундамента, которые затруднительно было идентифицировать по стандартной миграции Кирхгофа;
- визуально значительно улучшилось прослеживание отражающих горизонтов.

Результаты анализа данных керна, скважинного акустического сканера и промысловых данных. В ходе работы с геологической априорной информацией оценивалась связь анизотропии с различными геологическими факторами. Необходимо отметить, что на территории исследования в целевом интервале отсутствуют нарушения, сдвиги, сбросы, стрессовые зоны и т. д. Основное развитие дизъюнктивных нарушений характерно для нижележащих отложений рифейского возраста. В ходе работы было выдвинуто предположение о связи анизотропии со вторичными процессами, вызванными экзогенным гипергенезом, что подтверждено керновыми и каротажными данными.

Наиболее достоверным источником получения информации о трещиноватости является изучение скважинных данных: анализ керна, специальных методов ГИС (акустические и электрические микромиджеры) и гидродинамических исследований.

На изучаемой площади был выполнен анализ полученных результатов интерпретации данных САС-90 в двух скважинах.

Применение САС-90 в необсаженных скважинах позволяет осуществить литологическое расчленение разреза, выявлять кавернозные и трещинно-кавернозные зоны, тонкослоистые пропластки и желобы; определять профиль сечения скважины [Баширов и др., 2017].

По данным замера акустического сканера было установлено, что естественные трещины имеют средний угол падения 68.2° , преимущественное направление С-З—Ю-В. К наиболее трещиноватым отнесены доломитовые и доломитизированные баундстоуны — литотипы, слагающие ядро органогенной постройки. В отложениях задонского надгоризонта выделяются мелкокавернозный и кавернозный типы

коллектора. На некоторых участках в кровле задонского горизонта, по данным керна, были обнаружены высокопреобразованные кавернозные интервалы, заполненные ангидритом и глинистым веществом.

Выше по разрезу в отложениях елецкого надгоризонта они уступают место поровому типу коллектора. Трещиноватость также сильнее развита в нижнем интервале, хотя представлена немногочисленными трещинами. Эти результаты совпадают с результатами интерпретации стандартного каротажа и данных керна.

Основными работающими интервалами (по данным промыслово-геофизических исследований) являются интервалы с поровым и кавернозным типом коллектора (выделены по данным ГИС), по которым отмечаются притоки при опробовании в открытом стволе и при расходометрических исследованиях и термометрии в колонне. Трещиноватые пропластки редко соответствуют интервалам притока. В интервалах ангидритизации коллектора притоки практически не встречены.

Результаты AVAZ инверсии. По результатам выполнения полноазимутальной глубинной миграции по общему углу отражения была проведена подготовка данных для изучения направленной трещиноватости зон разуплотнения.

AVAZ анализ основан на изучении азимутальной вариации амплитуд в зависимости от угла раскрытия и азимута лучевой пары.

Входными данными для выполнения AVAZ инверсии были рефлексионные сейсмограммы в глубинном масштабе, подверженные мьютингу (41°). На выходе были получены кубы анизотропного градиента, интенсивности HTI анизотропии, связанной с изменением напряженности и мезотрещиноватости пород и направления HTI оси симметрии.

По результатам анализа рефлексионных сейсмограмм зарегистрировано наличие HTI анизотропии (рис. 3). В поисковом интервале, показанном на угловой развертке сейсмограммы (см. рис. 3, *a*), вдоль оси синфазности наблюдается вариация изменений амплитуд по трассам (рис. 3, *б*) в зависимости от азимута [Inozemtsev et al., 2013], на диске амплитуд рефлексионных сейсмограмм, полученного в интервале франско-фаменских отложений (см. рис. 3, *г*), в районе скв. 1 отличается направленная анизотропия амплитуд (аномалия в виде «седла»), по визуальной оценке, совпадающая с направлением анизотропии, выявленной по данным САС-90 (см. рис. 3, *в*). Для скважины 2 направленная анизотропия по данным САС-90 и по анализу анизотропии амплитуд не совпадает.

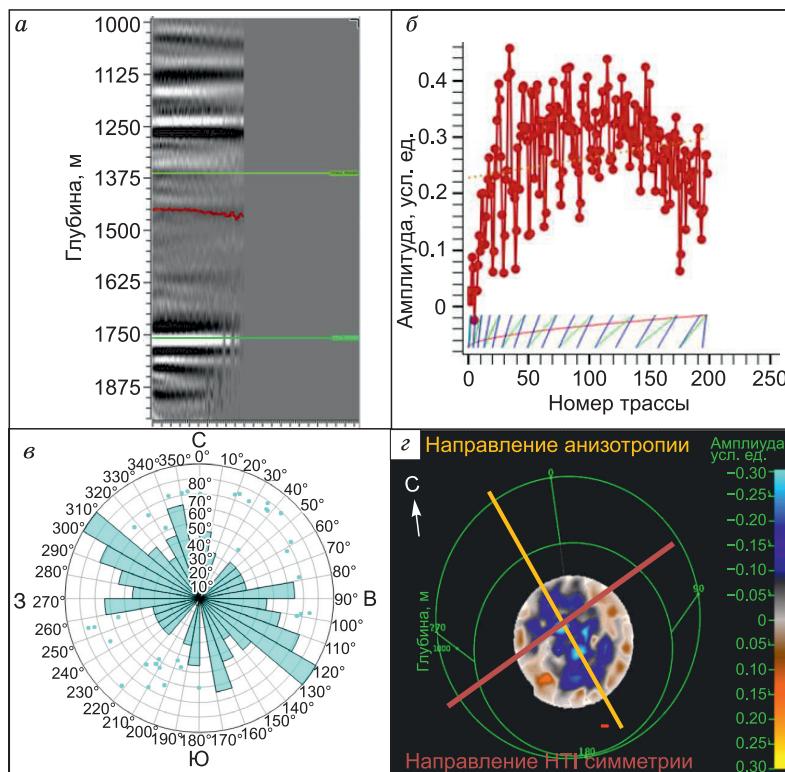


Рис. 3 Результаты AVAZ анализа в районе скважины с данными САС-90:

а — угловая развертка сейсмограммы с интервалом анализа (выделен зеленым цветом); *б* — оценка наличия направленной HTI анизотропии по рефлексионным сейсмограммам; *в* — роза-диаграмма азимутов простирания трещин по скв. 1 по данным САС-90 в целевом интервале; *г* — диск амплитуд, полученный в районе скв. 1 в целевом интервале.

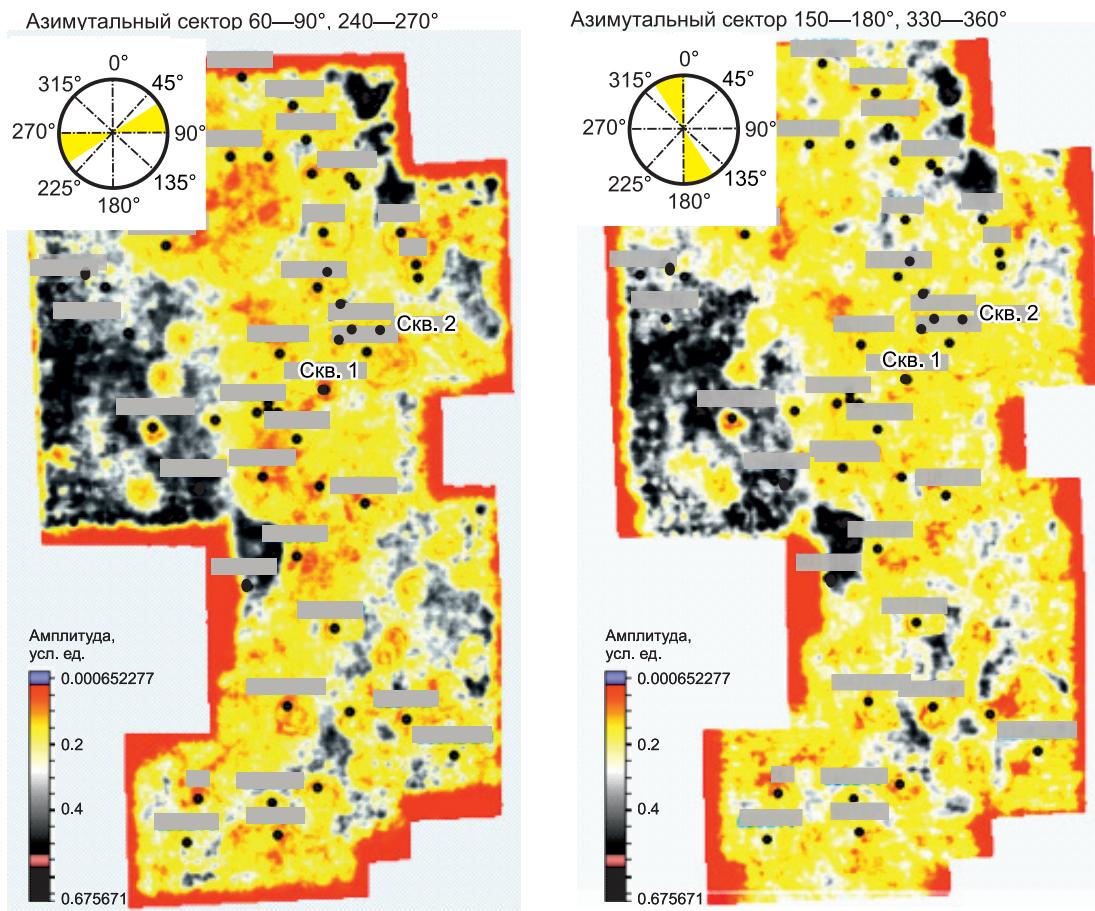


Рис. 4. Срезы частично угловых сумм по азимутальным секторам 60—90° и 150—180°

Диск амплитуд — это значения амплитуд вдоль горизонта для одной сейсмограммы. Диск амплитуд показывает пространственное изменение амплитуд в зависимости от угла падения/отражения и азимута. Соответственно, используя диск амплитуд, можно вычислить азимут анизотропии — направление, вдоль которого отмечается стабильное увеличение/уменьшение амплитуд. Совокупность таких дисков для каждой сейсмограммы дает возможность выделять области повышенной анизотропии в пространстве.

Оценка проводилась на срезах частично угловых сумм по азимутальным секторам (0—30°, 30—60°, 60—90°, 90—120°, 120—150° и 150—180°) визуально и численно по их разностным параметрам. Наибольшие различия наблюдаются в секторах 60—90° и 150—180°, что подтверждает наличие анизотропии на диске амплитуд, полученного по рефлексионным сейсмограммам в поисковом интервале. На рисунке 4 приведены такие срезы по секторам 60—90° и 150—180°. Наибольшие различия между срезами отмечаются в юго-восточной области. На остальной территории участка значения срезов практически не отличаются друг от друга, что может говорить об отсутствии здесь выраженной анизотропии.

Интенсивность азимутальной анизотропии, связанная с разной плотностью мезотрещин, оцененная по результатам AVAZ анализа рефлексионных сейсмограмм, может служить дополнительным критерием для выделения зон повышенной трещиноватости на площади исследования. Повышенные значения интенсивности наблюдаются в юго-восточной области и на севере участка, что может быть связано с большим количеством здесь органогенных построек. Однако установленный характер изменчивости двух других параметров анизотропии (градиент и направление) не имеет четко выраженных направленных трендов и в целом слабо коррелируют с контурами органогенных построек (рис. 5). Это может быть связано с хаотической направленностью систем трещин в целевом интервале.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Концептуальная седиментологическая модель, существующая на исследуемой территории, была получена в ходе комплексного изучения керна, данных о продуктивности вскрытых построек, информации о положении и амплитудах структур, а также о их гипсометрическом положении на площади работ.

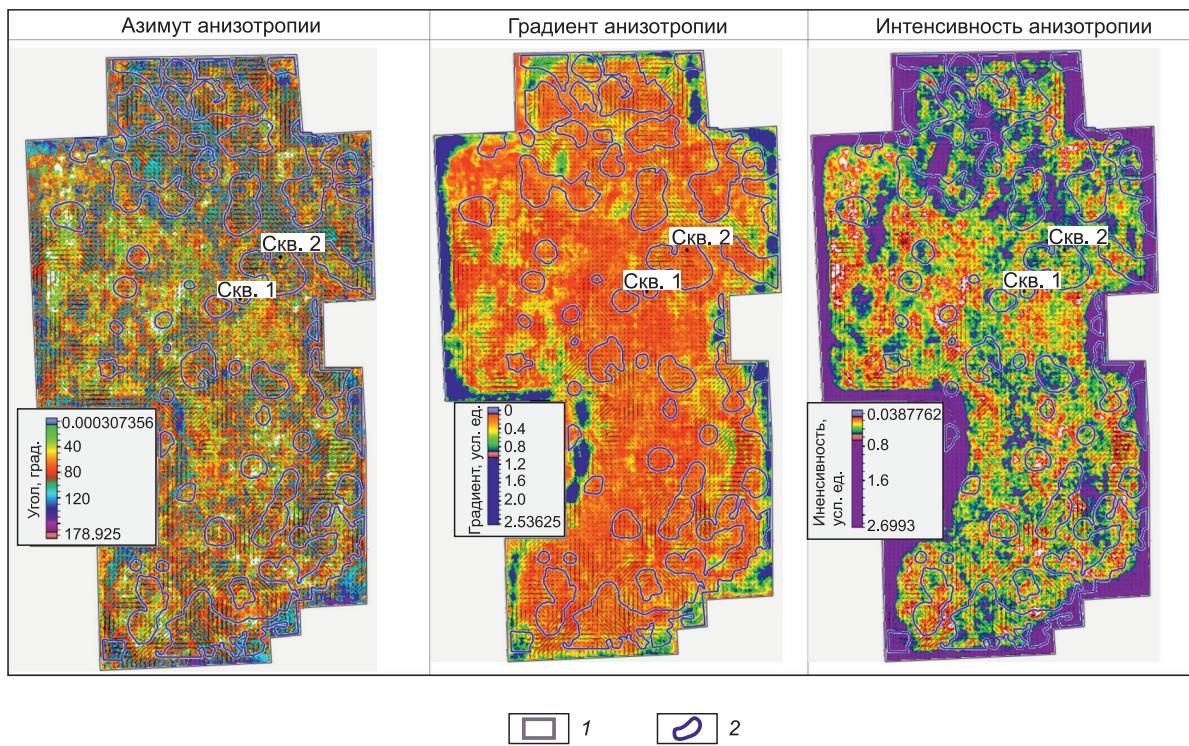


Рис. 5. Срезы кубов AVAZ инверсии: азимута, градиента и интенсивности анизотропии в продуктивном интервале, совмещенные с векторами направления трещин.

1 — контур работ, 2 — контуры органогенных построек.

Предполагается, что в конце задонского времени после очередного этапа формирования органогенных построек происходило уменьшение уровня моря, которое способствовало активному выщелачиванию и доломитизации. В этих условиях, как правило, развивается кавернозность и трещиноватость (рис. 6) [Вилесов, Чертина, 2020].

Часть построек, расположенных на юго-востоке изучаемого участка и на тот период — в наиболее высоком гипсометрическом положении, подвергалась наиболее значительным вторичным изменениям и обладала пониженной пустотностью и связанностью пустотного пространства, что подтверждается керновыми исследованиями, интервалами притока и приемистости скважин, а также дебитами скважин. При этом анизотропные свойства пород в таких постройках, по-видимому, усиливаются за счет неравномерности вторичных изменений. Так, по данным керна и рассчитанной объемной минеральной модели установлено, что именно в юго-восточной области участка выделяются значительные интервалы закарстованности, сульфатизации (до 2 м и более), глинизации, что говорит об активных постседиментационных изменениях на этом участке. Кроме того, данные расходометрии показывают, что из интервалов ангидрита практически не получен приток жидкости. Такие органогенные постройки, испытывавшие длительное воздействие гипергенных вод (ангидритизация и глинизация), обладают резко ухудшенным пустотным пространством (юго-восточная область).

Отмечается также, что центральная зона и северо-западная часть участка характеризуются более слабым проявлением вторичных процессов и не отличаются повышенной анизотропией.

Анализ векторных карт, направление векторов интенсивности анизотропии показывают, что преимущественно вся территория характеризуется пониженной анизотропией пород за исключением юго-восточной зоны, где преобладают постройки с признаками длительного выведения пород в область субаэральной экспозиции (см. рис. 6, а).

Таким образом, прослеживается связь между сейсмическим параметром — интенсивность анизотропии и областью развития гипергенных процессов.

При этом отмечено, что направление оси симметрии НТИ анизотропии, по данным VVAZ инверсии, равномерно изменяется по площади и не имеет трендовой направленности (о чем свидетельствует роза-диаграмма). Скважинные результаты слабо коррелируют с азимутальным направлением НТИ, полученным по данным VVAZ. В этой ситуации, возможно, имеет смысл в будущем опробовать орторомбический вариант полноазимутальной угловой миграции.

Стоит отметить, что за счет фокусировки волнового поля динамический анализ, по данным обработки после полноазимутальной угловой миграции, помог районировать площадь работ в интервале фран-фаменских отложений с привлечением геофизических исследований скважин и керна, специальных методов ГИС и оконтурить зоны менее перспективных участков (на рис. 6 выделены голубым цветом).

На участке была проведена классификация по форме трасс (см. рис. 6, б) с разделением на 15 зон. Выделяемые зоны были соотнесены с областями относительно глубоководного шельфа, органогенных

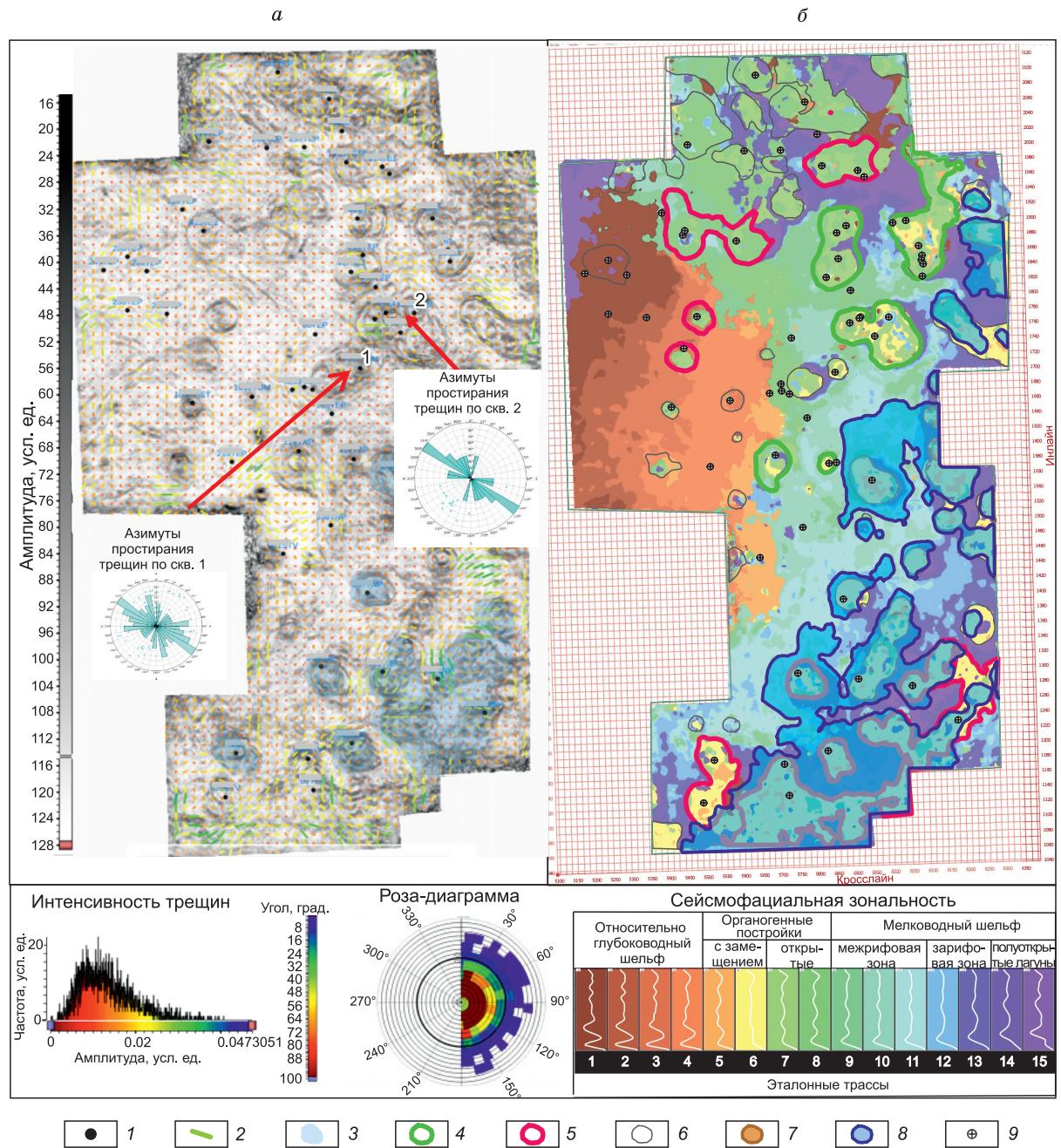


Рис. 6. Сопоставление направления трещин, выявленных по САС-90, с векторами направленности и интенсивности трещин, полученных в результате VVAZ инверсии, зон сульфатизации (а), а также концептуальной геологической модели с выделенными типами органогенных построек (б).

1 — местоположение скважин, 2 — вектор направленности и интенсивности анизотропии, 3 — местоположение органогенных построек, в которых по данным керна построек обнаружены интервалы вторичной сульфатизации и глинизации; контуры органогенных построек: 4 — с улучшенными ФЕС (высокопродуктивными скважинами), 5 — с ухудшенными ФЕС (с низкопродуктивными скважинами), 6 — нет данных о продуктивности, 7 — перспективные органогенные постройки; 8 — зона сульфатизации/глинизации; 9 — пластопересечение с пластом D₃fm₂ (кровля задонского горизонта).

построек и зоны мелководного шельфа, выявленных по данным седиментологического анализа керна и форм кривых ГИС.

Совместный анализ керновых и сейсмических данных позволил установить следующее.

В конце задонского времени (соответствующего нижнему этажу изучаемой нефтегазоносной толщи) после очередного этапа формирования органогенных построек происходит замедление их роста, условия становятся более мелководными, что способствует активному выщелачиванию и доломитизации. Наиболее мелководные условия существовали на юго-востоке, с увеличением глубины на северо-западе.

Наиболее приподнятые купола (расположенные на юго-востоке), дольше находящиеся в зоне субаэральной экспозиции (соответствуют зонам с преобладанием сейсмофаций 5—6), наиболее активно подвергаются процессам ангидритизации и глинизации, пустотность и связанность пустотного пространства таких построек резко падает, а коэффициент продуктивности скважин ($K_{\text{прод. жидк.}}$) составляет в среднем 0.1.

Постройки, гипсометрически находящиеся в пониженных условиях либо сформированные позже задонской регрессии, не испытывали на себе глубоких вторичных процессов, в них развит поровый и иногда порово-кавернозный тип коллектора (сейсмофации 7—8 в северо-западной зоне) ($K_{\text{прод. жидк.}} = 0.4$).

В области мелководного шельфа, включающей межрифовую зону (сейсмофации 9—11), зарифовую зону (сейсмофации 12—13) и полуоткрытые лагуны (сейсмофации 14—15), а также в области относительно глубоководного шельфа (сейсмофации 1—4) условия не способствовали формированию коллекторов с высокими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС), $K_{\text{прод. жидк.}}$ не превышает 0.2.

Органогенные постройки, образованные и расположенные в оптимальных условиях (большая мощность, относительное длительное воздействие метеогеновых вод), сформировали в себе потенциал для развития коллекторов с высокой долей кавернового типа пустотного пространства. При этом выщелачивание и доломитизация положительно повлияли на пустотность (центральная область, сейсмофации 7—8). Данные постройки обладают повышенными ФЕС, а скважины, вскрывающие такие постройки, высокими коэффициентами продуктивности ($K_{\text{прод. жидк.}} = 18$).

В елецкое время формируется следующая стадия рифообразования, но, в отличие от задонского, с более коротким этапом выведения в зону субаэральной экспозиции. Здесь процессы выщелачивания и доломитизации проявлены значительно слабее. Развиты в основном коллекторы с поровой и мелкокавернозной системой пустот.

ВЫВОДЫ

Анализ всей исходной геолого-геофизической информации совместно с данными опробования скважин позволили установить сложное сочетание различных типов пустотного пространства, наличие вторичных изменений коллектора, а также его неоднородность. Концептуальная модель предполагает, что в различные периоды формирования органогенных построек они подвергались интенсивным вторичным преобразованиям (включая активное выщелачивание, сульфатизацию и доломитизацию), что вызвало высокую неоднородность пустотности.

Применение полноазимутальной угловой миграции, проведенной в ходе исследования, позволило повысить геологическую информативность полученных данных: улучшить изображение и прослеживаемость зеркальных отражающих горизонтов и разломов в фундаменте, в 2.5 раза увеличилась разрешенность.

Установлено, что зарегистрированная на участках НТИ анизотропия скорее связана с кавернозностью и вторичными процессами (сульфатизация, глинизация), выявленными в юго-восточной области участка, нежели с трещиноватостью, которая может иметь (в том числе и в зоне органогенных построек) хаотическую направленность.

Азимутальная направленность анизотропии в целом не нашла четкой корреляции со скважинными данными акустического сканера, однако интенсивность анизотропии достаточно четко коррелирует с зонами высокого влияния вторичных процессов: кавернозностью, ангидритизацией и глинизацией, установленных по керновым и каротажным данным. Скважины, пробуренные в этих зонах, отличаются низкими коэффициентами продуктивности.

Выделенные зоны с повышенной интенсивностью анизотропии позволили выделить области ухудшенных фильтрационно-емкостных свойств, что необходимо учитывать при оценке рисков подобных участков.

Кроме того, сопоставление полученных результатов с динамическим, седиментологическим и литолого-фациальным анализами, позволило установить латеральную неоднородность органогенных построек в зависимости от их гипсометрического положения и степени влияния вторичных преобразований. В ходе работы были выделены постройки, находящиеся в оптимальных условиях с точки зрения сохранности пустотного пространства. Они определены как перспективные для дальнейшего изучения и разбуривания.

ЛИТЕРАТУРА

- Баширов И.Р., Масагутов Р.Х., Емельянов Д.Е., Пиденко А.В., Попов А.А., Щербак А.С., Ягфаров И.И.** Выделение зон трещиноватости горных пород специальными методами ГИС и их подтверждаемость по данным ИПТ на месторождениях ПАО АНК «Башнефть» // Геофизика, 2017, № 3, с. 44—51.
- Богатырев И.Ю., Семин Д.Г., Ольниева Т.В., Иноземцев А.Н.** Опробование технологии полно-азимутальной угловой миграции Earthstudy360® при исследовании донеогенового основания на одном из месторождений Республики Сербия // Технологии сейсморазведки, 2017, № 1, с. 63—71.
- Бурикова Т.В., Душин А.С., Привалова О.Р., Ахметзянов Р.В., Неудачин Н.А., Кинзикеева А.Р., Червякова А.Н.** Связь литотипов и петрофизической неоднородности карбонатных коллекторов верхнего девона платформенной части Башкортостана // Нефтяное хозяйство, 2018, № 6, с. 42—45, doi: 10.24887/0028-2448-2018-6-42-45.
- Вилесов А.П., Чертинга К.Н.** Палеокарст, гидротермокарст и карстовые коллекторы франских рифов Рыбкинской группы // Георесурсы, 2020, т. 22, № 2, с. 15—28, doi: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.15-28>.
- Душин А.С., Мельников А.В., Федоров А.И., Рыкус М.В.** Новая флюидодинамическая модель карбонатного коллектора месторождения им. Р. Требса на основе синтеза геологических и промысловых данных // Нефтегазовое дело, 2016, т. 15, № 2, с. 13—23.
- Терехов О.В., Горохов В.М., Садыков А.Р., Береснев В.В.** Акустический сканер САС-90 как инструмент для решения геолого-геофизических задач при исследовании скважин // Каротажник, 2012, № 7—8 (217—218), с. 25—34.
- Чернышов С.Е., Попов С.Н., Варушкин С.В., Мелехин А.А., Кривошеков С.Н., Шаоран Рен.** Научное обоснование методов вторичного вскрытия фаменских отложений юго-востока Пермского края на основании геомеханического моделирования // Записки Горного института, 2022, т. 257, с. 732—743, doi: 10.31897/PMI.2022.51.
- Hollander Y., Kosloff D., Koren Z., Bartana A.** Seismic data interpolation by orthogonal matching pursuit // 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC, Copenhagen, 2012, doi: [10.3997/2214-4609.20148144](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20148144).
- Inozemtsev A., Stepanov I., Galkin A., Zvi K.** Applying full-azimuth angle domain pre-stack migration and AVAZ inversion to study fractures in carbonate reservoirs in the Russian Middle Volga region // First Break, 2013, v. 31 (2), p. 79—83, doi: [10.3997/1365-2397.31.2.66661](https://doi.org/10.3997/1365-2397.31.2.66661).
- Khaidukov V., Landa E., Moser T.J.** Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution // Geophysics, 2004, v. 69, p. 1478—1490, doi: [10.1190/1.1836821](https://doi.org/10.1190/1.1836821).
- Koren Z., Ravve I.** Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging Part I: Directional and reflection image gathers // Geophysics, 2011a, v. 76 (1), p. S1—S13, doi: [10.1190/1.3511352](https://doi.org/10.1190/1.3511352).
- Koren Z., Ravve I.** Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging: Part 2 — Local angle domain // Geophysics, 2011b, v. 76 (1), p. S51—S64, doi: [10.1190/1.3549742](https://doi.org/10.1190/1.3549742).
- Landa E., Fomel S., Reshef M.** Separation, imaging, and velocity analysis of seismic diffractions using migrated dip-angle gathers // 78th Annual International Meeting, SEG, 2008, Expanded Abstracts, p. 2176—2180, doi: [10.1190/1.3059318](https://doi.org/10.1190/1.3059318).
- Minigalieva G., Nigmatyanova A., Burikova T., Privalova O., Akhmetzhanov R., Kinzikeeva A.** Well log analysis for reservoir characterization of Famenian carbonates with criterion of texture heterogeneity. Paper number SPE-191677-18RPTC-MS, 2018, doi: [10.2118/191677-18RPTC-MS](https://doi.org/10.2118/191677-18RPTC-MS).