

Опыт использования поля рассеянных волн для прогноза зон трещиноватости и оценки проводимости разломов на нефтегазовом месторождении

В. И. Кузнецов

ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
vikuznetsov@novatek.ru

Аннотация. Основной задачей современного развития нефтяной индустрии в каждом конкретном районе является разработка рациональной стратегии разведки и добычи углеводородов, обеспечивающей оптимум между необходимым уровнем добычи в текущий ее момент и разведанными запасами. В связи с этим требования к нефтегазовой геофизике постоянно возрастают. Происходит переориентация геологоразведочных работ на поиски сложнопостроенных ловушек нефти и газа, возрастает важность проблем, связанных с неравномерным латеральным распределением коллекторских свойств и, в первую очередь, пористости и проницаемости горных пород. Стандартные методические приемы, применяемые при сейсмических исследованиях, уже не обеспечивают уверенного решения геологических задач.

Работа посвящена тестированию технологии прогноза зон трещиноватости геологического разреза и оценки проводимости для флюидов тектонических нарушений на нефтегазовых месторождениях. Решение этой задачи существенно повысит эффективность разработки залежей сложнопостроенных месторождений. Обычно определение проводимости разломов и зон трещиноватости выполняется на основе геолого-промысловых данных и в явном виде не применяется ни в геологической, ни в гидродинамической модели. Представлена попытка на реальном объекте использовать поле рассеянных сейсмических волн для прогноза трещиноватости геологической среды и свойств разломов. Для оценки возможностей данного подхода проведено моделирование, подтвердившее работоспособность технологии, обработан массив реальных данных, осуществлено сопоставление с промысловыми данными.

Ключевые слова: трещиноватость, рассеянные волны, тектонические нарушения, геологическая модель

Для цитирования: Кузнецов, В. И. Опыт использования поля рассеянных волн для прогноза зон трещиноватости и оценки проводимости разломов на нефтегазовом месторождении / В. И. Кузнецов. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-6-69-78 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 6. – С. 69–78.

Practical results of scattered waves using for prediction of fractures zones and evaluation of faults conductivity concerning oil and gas field

Vladislav I. Kuznetsov

LLC "NOVATEK SRC", Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
vikuznetsov@novatek.ru

Abstract. The main task in the modern development of the oil industry in in each area is creating a rational strategy for the exploration and hydrocarbon production. This strategy ensures an optimal balance between the required production level and explored reserves. In this regard, oil and gas geophysics requirements are constantly increasing. Geological exploration is being reoriented to search for complex oil and gas traps. Importance of the issues related to the uneven lateral distribution of reservoir properties — primarily porosity and permeability of rocks — is increasing. Standard methodological techniques used in seismic studies no longer provide reliable solutions of geological tasks.

This article focuses on testing technology of fracture zone prediction in geological sections and assessing conductivity for fluids of tectonic disturbances at oil and gas fields. The solution of this task will significantly increase the efficiency of pools development concerning oil and gas fields characterized by complicated geological structure. Typically, evaluation of faults and fractures conductivity is accomplished on the basis of geological and production data. Fault conductivity and fracture zone data in explicit form is not used neither in geological modeling nor in hydrodynamic modeling. This study presents an attempt to apply the diffuse seismic wave field to predict fracture zones in the geological environment and the properties of faults at a real site. Modeling was carried out to assess the potential of this approach, confirming the technology's viability. Further, real data was processed and compared with field data. Real data was processed and compared with field data.

Keywords: fracturing, scattered waves, tectonic disruption, geological model

For citation: Kuznetsov, V. I. (2024). Practical results of scattered waves using for prediction of fractures zones and evaluation of faults conductivity concerning oil and gas field. *Oil and Gas Studies*, (6), pp. 69-78. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-6-69-78

Введение

Выбранный для исследований участок находится в зоне сочленения трех крупнейших структурно-формационных зон или блоков фундамента Западной Сибири. Доюрский фундамент представляет собой результат наложения герцинской складчатости на структурно-тектонические ярусы палеозоя. Наложение двух систем напряжений обусловило своеобразную конфигурацию тектонических элементов. Так, в доюрском основании мы наблюдаем сбрососдвиговые нарушения и видим основные региональные разломы простиранием с северо-запада на юго-восток. При этом формирование вала в режиме сжатия в позднем мелу и палеогене сопровождалось интенсивными сдвиго-надвиговыми движениями. Вследствие этого структурные планы кровли доюрских образований, юры и нижнего мела осложнены системой нарушений преимущественно меридионального направления, но имеют несколько ответвлений субширотного простирания. Их еще называют сколами Риделя. Такая система тектонических нарушений обуславливает наличие зон трещиноватости и дробления (рис. 1).

Согласно теоретическим представлениям, флюидопроницаемые разрывные нарушения и сопровождающие их зоны трещиноватости проявляются в рассеянных волнах повышенными значениями амплитуд, а флюидонепроницаемые разломы не содержат открытых трещин и не проявляются в рассеянных волнах [1–6].

Выделение и трассирование тектонических нарушений по данным геофизики является известным подходом. Однако определение свойств (проводимости) разломов и сопутствующих зон трещиноватости по отраженным волнам невозможно без привлечения промысловых данных и данных бурения. И зачастую подобная оценка происходит постфактум, что не позволяет учесть риски и перспективы, связанные с этими зонами.

Задача исследований состоит в разработке методики оценки свойств выделенных разрывных нарушений.

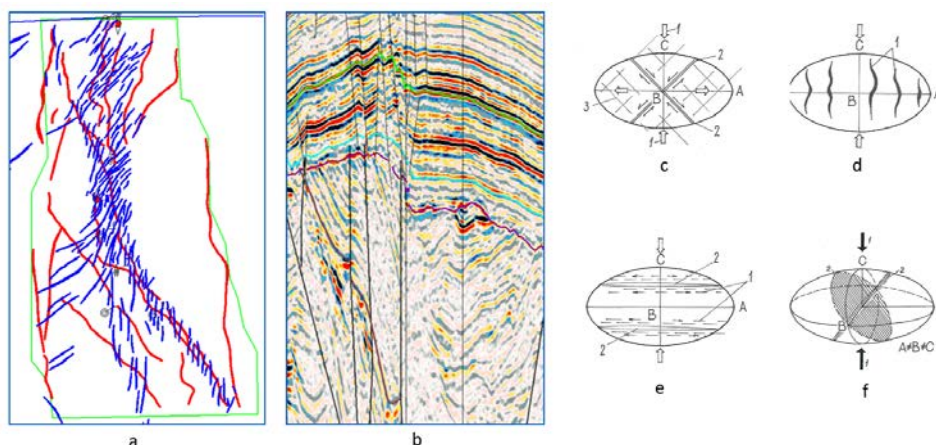


Рис. 1. Тектоническая модель участка по горизонтам А и Т1 (а). Композитный сейсмический разрез (б). Типы трещин: скалывания (с), отрыва (d), сплющивания (е). Эллипсоид деформации (f)

Объект и методы исследования

Как правило, на этапе комплексной интерпретации сейсмических данных выделяются геометрические границы тектонических нарушений и осуществляется качественный прогноз их свойств. При этом разлом имеет определенную зону, которая включает в себя не только тектониты разломного сместителя, но и существенно большие по размерам объемы горных пород, в которых имеют место генетически связанные с формированием нарушения пластические и разрывные деформации (рис. 1). Такие зоны могут быть как флюидопроницаемые, так и флюидонепроницаемые (непроводящие).

Выделение и оценка свойств таких зон по сейсмическим данным на настоящий момент до конца не решенная задача. Определение проводимости разломов и зон трещиноватости выполняется на основе геолого-промысловых данных и в явном виде не используется ни в геологической модели, ни в гидродинамической модели.

Необходимо отметить, что по результатам исследования керна (обработки люминофором) было определено наличие многочисленных

субгоризонтальных, пологих, согласно секущих, изломанных, преимущественно открытых трещин, местами заполненных глинистым материалом.

Для прогноза и оценки свойств разломов и зон трещиноватости по рассеянным волнам данных стандартных систем наблюдений используются технологии специализированной обработки. В результате анализа рынка была выбрана методика обработки по технологии FractureCSP компании АО «Технологии обратных задач».

В рамках тестирования технологии были выполнены:

- оценка и подтверждение работоспособности технологии (2D-моделирование);
- оценка ограничений и возможностей технологии;
- оценка перспектив использования технологии на стадии ГРП (палеозой, юра);
- прогноз зон развития естественной трещиноватости в целевых интервалах разреза (палеозой, юра);
- ранжирование разломов по проводимости;
- сопоставление с промысловыми данными (шумометрия, гидроразрыв пласта, поглощения, гидродинамическое исследование скважин);
- проведение секторного моделирования на ГДМ;
- тестирование моделирования трещиноватости на ГМ;
- рекомендации по проведению дальнейших геологоразведочных работ;

Для оценки работоспособности технологии, на основе реальных геолого-геофизических данных, полученных по результатам работ на данном месторождении, было построено несколько синтетических моделей. Модели использовались для тестирования возможностей метода по разделению разрывных нарушений на два вида: флюидопроницаемые и флюидонепроницаемые.

В реальных геологических условиях, как показало моделирование, непроницаемые/залеченные разломы (разломные зоны) будут характеризоваться интенсивностью рассеяния, на уровне фоновых значений, тогда как зоны с открытой трещиноватостью — повышенными.

Разлом без смещения по сути и есть некая приближенная модель трещин. Так, в синтетической модели разлома без смещения имитировались флюидопроницаемые вертикальные разломные зоны с открытой трещиноватостью, заполненные нефтью, газом, а также разломные зоны, трещины которых залечены вторичными минералами. Все эти объекты проявились в поле рассеянных волн с различными амплитудами рассеяния. Разлом с открытой трещиноватостью, заполненный газом, сформировал наиболее интенсивную зону рассеяния с амплитудами волн до 0,237 у.е. Немного меньшие амплитуды наблюдаются в разломной зоне насыщенной нефтью — до 0,183 у.е. В то же время разлом, залеченный вторичными минералами, характеризовался низкими амплитудами рассеянных волн, менее

0,054 у.е., и на соответствующем разрезе почти не выделялся на фоне проницаемых разломов (рис. 2).

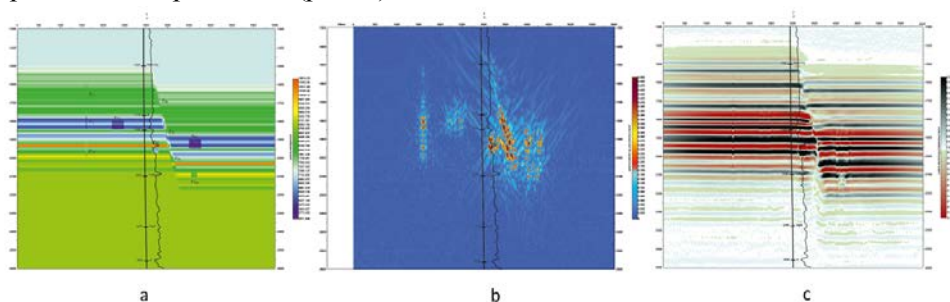


Рис. 2. Результаты математического моделирования: исходная модель P-импедансов (а), разрез рассеянных волн (b), разрез отраженных волн (с)

Значения амплитуд рассеянных волн, полученные в результате математического моделирования, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты математического моделирования

Наименование / № трещиноватости / разлома	Моделируемое насыщение	Акустический контраст (% от вмещающей среды)	Средние амплитуды рассеянных волн
$F_{1н}$	нефть	-15	0.086
$F_{2г}$	газ	-25	0.237
$F_{3н}$	нефть	-15	0.113
$F_{4г}$	газ	-25	0.144
$F_{2з}$	втор.минералы	+10	0.054
$F_{2г}$	газ	-25	0.225
$F_{2н}$	нефть	-15	0.183

Полученные на этапе моделирования результаты свидетельствуют о работоспособности выбранной технологии и применимости технологии для решения заявленных задач — выявления зон трещиноватости и разделения разрывных нарушений на проницаемые и непроницаемые. По результатам моделирования и анализа всей информации сделаны следующие выводы:

- по кубу рассеянных волн можно выделять зоны, соответствующие открытой трещиноватости и проводимости разломов;
- связаны они могут быть с разломами со смещением и без смещения, с серией трещин;
- разрешенность получаемых данных сопоставима с разрешенностью отраженных волн и составляет 15–20 м;
- прогнозировать насыщение углеводородами (УВ) нельзя, так как контрасты между насыщением газом/нефтью/водой очень близки;
- зоны повышенного рассеяния характеризуются повышенной проницаемостью.

Результаты

После этапа моделирования по технологии выделения поля рассеянных волн был обработан реальный куб данных 3D-сейсморазведки с участка исследований и проведена интерпретация полученных материалов.

Первым этапом использования результирующих данных стал анализ перспектив выделенных в доюрском основании ловушек. Для оценки перспективности объектов в пермском интервале разреза выполнено ранжирование по предполагаемому наличию трещиноватых коллекторов. На рисунке 3 видно, что выделенный объект имеет значительное распространение по площади, однако трещиноватый коллектор выделяется только на севере. Подобный анализ был выполнен и для других, выделенных по стандартным критериям, объектам.

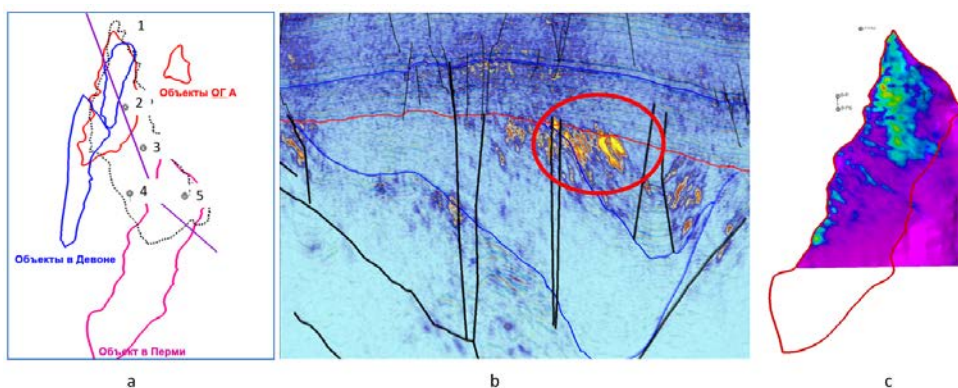


Рис. 3. Выделенные на участке перспективные объекты (а), перспективные объекты в пермских отложениях, выделенные по рассеянным волнам пермские объекты на разрезе (b) и на карте амплитуд (с)

Для оценки перспектив использования куба рассеянных волн необходимо выполнять сопоставление с промысловыми данными, однако оценивать результат на скважинах с горизонтальным стволом по начальному дебиту, газовому фактору и приемистости нельзя, так как есть зависимость от длины ствола, эффекта от проведенного гидроразрыва пласта (ГРП) и т. д. Риски при сопоставлении связаны с неоднозначностью скоростной модели (ошибки по глубине), разницей масштабов и разрешенности данных сеймики и промыслово-геофизических исследований (ПГИ), наличием ГРП в скважинах (скважины вводились после ГРП).

На основе выделенных по технологии тел было выполнено ранжирование разломов по проводимости. При сопоставлении карты прогнозных проницаемых разломов с данными из гидродинамической модели (ГДМ) можно утверждать, что большая часть из них хорошо согласуется с модифицированными зонами в ГДМ.

По результатам сопоставления с данными геомеханического моделирования можно с уверенностью сказать, что технология позволяет определять основные проводимые разломы с достаточно высокой точностью.

Дальнейшее сопоставление рассеянной компоненты волнового поля с промысловыми данными показало перспективность использования этой информации на этапе проектирования горизонтальных стволов эксплуатационных скважин, для прогноза проводимых каналов, а также для снижения рисков при бурении и проводке горизонтальных стволов скважин. На рисунке 4 представлена горизонтальная скважина № 1 с нанесенной шумометрией вдоль ствола.

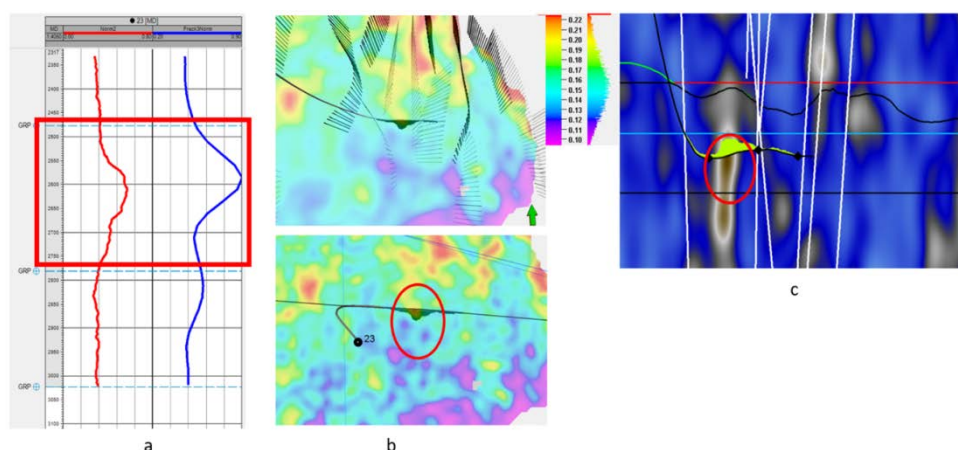


Рис. 4. Сопоставление зоны повышенных значений амплитуд рассеянных волн с данными шумометрии по ГИС (а), на уровне карт (b) и на разрезе (с)

Черными ромбами указаны порты ГРП. По разрезу видно хорошее сопоставление с шумометрией, по карте также выделяется зона повышенных амплитуд рассеянных волн, по ГИС коэффициент корреляции составил 0,8. По ряду скважин сопоставление было ниже среднего. Низкое сопоставление зачастую связано с ошибочным определением положения из-за неоптимального скоростного закона. По карте зоны хорошо коррелируются с шумометрией, а также наличием ГРП.

По результатам качественного и количественного анализа можно сделать вывод, что по кубу рассеянных волн на качественном уровне можно выполнять прогноз перспективных зон, характеризующихся повышенной проводимостью. Средневзвешенная оценка возможности выделения перспективных зон для бурения эксплуатационных скважин составила 73 %.

Эффективность ГРП в трещинном коллекторе низкая. И при сопоставлении карты средних значений рассеянных волн в продуктивном интервале пласта с картой значений эффективности мини-ГРП можно отметить общее сходство зон повышенных и пониженных значений эффективности ГРП с зонами распространения трещинного коллектора.

Зоны повышенной трещиноватости хорошо сопоставляются с общей проницаемостью по модели (черными изолиниями) на рисунке 5.

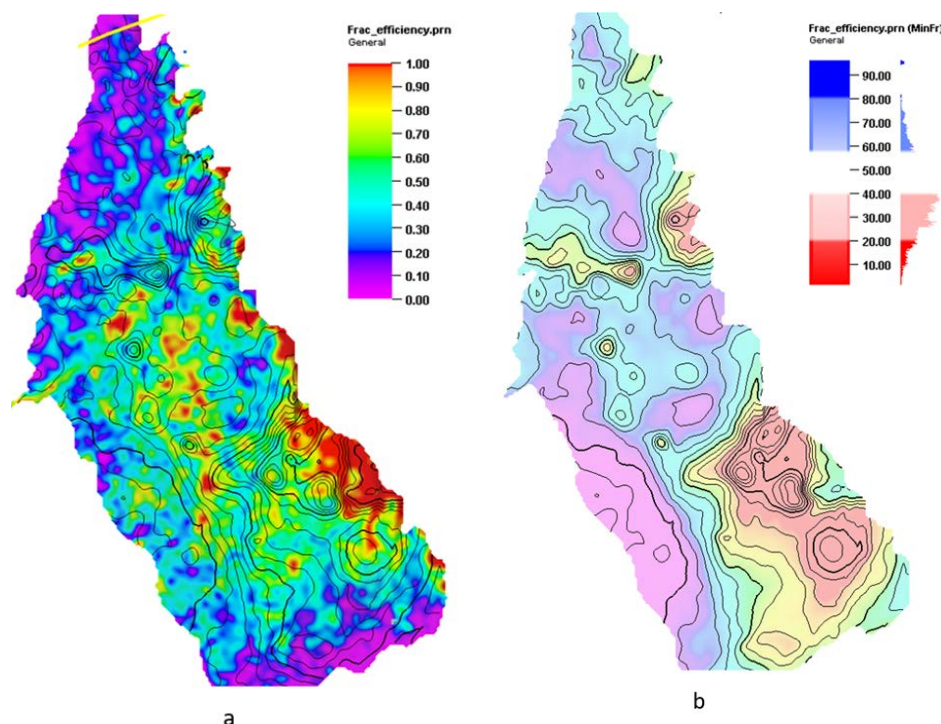


Рис. 5. Сопоставление полученных данных с существующей моделью проницаемости. Карта общей проницаемости по геологической модели (a). Карта амплитуд рассеянных волн в целевом интервале (b)

На основе данных о разломах и интерпретации сейсмики методом рассеянных волн была построена карта плотности трещин по площади месторождения. Данный тренд определил распределение проницаемости и пористости трещин в объеме породы для гидродинамических расчетов в модели двойной среды. В связи с тем, что геометрия трещин намного меньше размеров расчетной ячейки, эффект от использования модели двойной пористости при моделировании отсутствует. Учет зон трещиноватости производился увеличением проводимости породы в рамках концепции опорной среды.

Основная рекомендация к применению куба рассеянных волн в разработке — учет на этапе фациального моделирования.

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что использование данных рассеянной компоненты для этапа геологоразведочных работ является перспективным. На этапе разработки и эксплуатации

месторождения данные рассеянной компоненты можно использовать пока только на качественном уровне. Это позволяет:

- выполнять прогноз перспективных зон, которые характеризуются повышенной трещиноватостью;
- выполнять прогноз интервалов поглощения и обводнения по проводимым каналам на качественном уровне;
- выделять проводящие зоны, представляющие риски в процессе бурения;
- оптимизировать схемы разработки для месторождений со сложным тектоническим строением.

Список источников

1. Построение сейсмических изображений в рассеянных волнах как средство детализации сейсмического разреза / С. В. Гольдин, М. Ю. Смирнов, В. А. Поздняков, В. А. Чеверда. – Текст : непосредственный // Геофизика. – 2004. – № 5. – С. 23–29.
2. Прогноз трещинно-кавернозных коллекторов в верхнеюрских отложениях Западной Сибири / Г. Н. Ерохин, А. Н. Кремлев, Л. Е. Стариков, А. В. Киричек. – Текст : непосредственный // Бурение и нефть. – 2010. – № 7–8. – С. 22–25.
3. Киричек, А. В. Прогноз трещинно-кавернозных коллекторов в продуктивных породах Краснотуркменского свода по рассеянным волнам / А. В. Киричек, М. А. Зверев. – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2011. – № 1. – С. 24–33.
4. Особенности отражения трещиноватости среды полем рассеянных волн и низкочастотной составляющей отраженных волн / В. З. Кокшаров, В. И. Кузнецов, М. Ю. Смирнов, В. М. Вингалов. – Текст : непосредственный // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа. Т. 2 : восьмая научно-практическая конференция, Ханты-Мансийск, 16–18 ноября 2005 г. – Ханты-Мансийск : ИздатНаукаСервис, 2005. – С. 364–368.
5. Кузнецов, В. И. Опыт использования поля рассеянных сейсмических волн для прогноза нефтегазонасыщения / В. И. Кузнецов, Ю. А. Курьянов, В. З. Кокшаров. – Текст : непосредственный // Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири : материалы международной академической конференции, Тюмень, 11–13 октября 2006 г. – Тюмень : ЗапСибНИИГГ, 2007. – С. 96–104.
6. Опыт использования поля рассеянных сейсмических волн для прогноза зон нефтегазонасыщения / Ю. А. Курьянов, В. И. Кузнецов, В. З. Кокшаров, М. Ю. Смирнов. – Текст : непосредственный // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 1. – С. 60–69.

References

1. Goldin, S. V., Smirnov, M. Yu., Pozdnyakov, V. A., & Cheverda, V. A. (2004). Postroenie seysmicheskikh izobrazheniy v rasseyannykh volnakh kak sredstvo detalizatsii seysmicheskogo razreza. Journal of geophysics, pp. 23-29. (In Russian).

2. Yerokhin, G. N., Kremlev, A. N., Starikov, L. E., & Kirichek, A. V. (2010). Forecast of fractured-cavernous reservoirs in Upper Jurassic deposits of Western Siberia. *Burenie i nef't*, (7-8), pp. 22-25. (In Russian).
3. Kirichek, A. V., & Zverev, M. A. (2011). Forecast of fracture-cavernous reservoirs presence in producing rocks of krasnoleninsky arch by scattered waves method. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, (1), pp. 24-33. (In Russian).
4. Koksharov, V. Z., Kuznetsov, V. I., Smirnov, M. Yu., & Vingalov, V. M. (2005). Osobennosti otrazheniya treshchinovatosti sredy polem rasseyannykh voln i nizkochastotnoy sostavlyayushchey otrazhennykh voln. Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga. T. 2: vos'maya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Khanty-Mansiysk, IzdatNaukaServis Publ., pp. 364-368. (In Russian).
5. Kuznetsov, V. I., Kur'yanov, Yu. A., & Koksharov, V. Z. (2007). Opyt ispol'zovaniya polya rasseyannykh seysmicheskikh voln dlya prognoza neftegazonasyshcheniya. Sostoyanie, tendentsii i problemy razvitiya neftegazovogo potentsiala Zapadnoy Sibiri: materialy mezhdunarodnoy akademicheskoy konferentsii. Tyumen, ZapSibNIIGG Publ., pp. 96-104.
6. Kur'yanov, Yu. A., Kuznetsov, V. I., Koksharov, V. Z., & Smirnov M. Yu. (2008). Opyt ispol'zovaniya polya rasseyannykh seysmicheskikh voln dlya prognoza zon neftegazonasyshcheniya. *Tekhnologii seysmorazvedki*, (1), pp. 60-69. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Кузнецов Владислав Иванович,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, старший эксперт
НОВАТЭК НТЦ, профессор кафедры
прикладной геофизики, Тюменский ин-
дустриальный университет, г. Тюмень,
vikuznetsov@novatek.ru

Vladislav I. Kuznetsov, Doctor of
Geology and Mineralogy, Professor,
Senior Expert of LLC «NOVATEK
NTC», Professor at the Department of
Applied Geophysics, Industrial Universi-
ty of Tyumen, vikuznetsov@novatek.ru

Статья поступила в редакцию 05.11.2024; одобрена после рецензирования 13.11.2024; принята к публикации 15.11.2024.

The article was submitted 05.11.2024; approved after reviewing 13.11.2024; accepted for publication 15.11.2024.