

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК 550.8.055

DOI: [10.46698/VNC.2021.13.51.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.13.51.008)

Оригинальная статья

Методика локального улучшения суммирования ОСТ для повышения прослеживаемости отдельных отражающих горизонтов

А. А. Дробинский , О. А. Жуковская 

Астраханский государственный технический университет, Россия, 414056,
г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: a. drobinskiy@yandex. ru;

Статья поступила: 16.04.2021, доработана: 12.05.2021, одобрена в печать: 20.05.2021

Резюме: Актуальность работы. В последние годы всё больше объектов сейсморазведочных работ относится к проблемным территориям, характеризующимся неблагоприятными поверхностными условиями и сложной геологической обстановкой. Получение качественных сейсмических изображений при обработке в таких случаях входит в число приоритетных направлений современной сейсморазведки. Одним из путей решения проблем ухудшения прослеживаемости сейсмических горизонтов в сложных условиях является оптимизированное суммирование общей средней точки (ОСТ), учитывающее качество входных сейсмических данных. **Цель исследования.** Настоящая работа посвящена созданию и тестированию гибкой, универсальной методики оптимизации суммирования ОСТ на конечной стадии полевой или камеральной обработки сейсмических данных метода отражённых волн общей глубинной точки (МОВ-ОГТ 2D/3D) для улучшения прослеживаемости отражающих горизонтов. При создании такой методики важным требованием являлась возможность реализации в существующем программном обеспечении (ПО), в том числе, отечественном. **Методы исследования.** Для исследования влияния сложных геологических объектов на распределение энергии в выборках ОСТ было выполнено построение иллюминационной модели по целевому горизонту, расположенному под эрозионным врезом. Оценка влияния рассеивающих аномалий верхней части разреза (ВЧР) проводилась с помощью двумерного лучевого моделирования с получением синтетических сейсмограмм ОПВ по горизонтально-слоистому модельному разрезу, содержащему участок палеокарста. Чтобы оценить потенциал применения предлагаемой методики были генерированы синтетические данные, содержащие сильные помехи различной природы, а также зону падения амплитуды полезного сигнала. По этим данным были разными способами получены и оценены суммарные трассы. Предлагаемая методика также была опробована на реальных данных метода общей глубинной точки (МОГТ-2D). Оценка результатов работы различных вариантов суммирования выполнялась визуально, а также количественно (с помощью атрибутного анализа). **Результаты работы.** Выполненное исследование показало недостаточную эффективность стандартного суммирования ОСТ для сложных сейсмических данных. Польза от применения существующих методик улучшения суммирования ОСТ очевидна, но они имеют недостатки: нарушение естественной динамики волновой картины, невозможность локального применения, необходимость реализации в специальном ПО. Предлагаемая авторами методика оптимизации суммирования даёт высокую гибкость и маневренность работы и позволяет справиться с вышеуказанными проблемами. Свободный выбор критериев взвешивания интервалов трасс на основе анализа пользовательского набора атрибутов открывает широкие возможности тонкой настройки процедуры, вводит интерпретационную составляющую в процесс оптимизации суммирования, делая его более осмысленным в геолого-геофизическом отношении. Предлагаемая методика не требует написания и опробования нового специального ПО и может быть реализована в уже имеющихся сейсмических пакетах, включая и российские программные комплексы.

Ключевые слова: сейсморазведка МОГТ, обработка, сигнал, помеха, суммирование, матрица, вес, прослеживаемость.

Для цитирования: Дробинский А. А., Жуковская О. А. Методика локального улучшения суммирования ОСТ для повышения прослеживаемости отдельных отражающих горизонтов. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): 103 – 117. DOI: [10.46698/VNC.2021.13.51.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.13.51.008).

[DOI: 10.46698/VNC.2021.13.51.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.13.51.008)

Original paper

Local CMP stacking improvement technique for better traceability of separate reflection horizon

A. A. Drobinskiy , O. A. Zhukovskaya Astrakhan State Technical University, 16 Tatischeva Str., Astrakhan 414056,
Russian Federation, e-mail: a. drobinskiy@yandex. ru

Received: 16.04.2021, revised: 12.05.2021, accepted: 20.05.2021

Abstract: Relevance. Today increasingly more objects of prospecting seismology belong to problem areas characterized by unfavorable surface conditions and complex geological situation. Acquiring of high-quality seismic images by processing in these cases is a part of priority directions of modern prospecting seismology. One of the way to overcome the problem of seismic horizon traceability worsening in hard conditions is optimized CMP stacking, considering the quality of input seismic data. **Aim.** This work is devoted to generation and examination of flexible universal technique of optimized stacking on the last stage of field or final processing of 2D/3D reflection seismic data for seismic horizon traceability improvement. Creating this technique assumed important condition of embodiment ability in existing software (including Russian). **Methods.** Illumination model building was performed for target horizon, located beneath the erosive cut for studying of complex geological objects influence on energy distribution in CMP gathers. Scattering superficial anomalies influence was estimated by means of 2D ray tracing and synthetic shot records generation on horizontally layered model section consisting near surface ancient karst spot. Synthetic data with different kinds of noise and signal amplitude decay zone was generated to appreciate implementation potential of introducing technique. Stacked traces were obtained and evaluated on this data with different methods. The introduced technique was tested on real 2D seismic data too. Evaluation of results of different kinds of stacking was performed by sight and with quantitative (attribute) analysis. **Results.** Performed research showed insufficient efficiency convenience CMP stacking for complex seismic data. The advantages of existing CMP stacking improvement methods are obvious but there are drawbacks too: natural wave field dynamic violation, disability of local implementation, need of special software development. Offered technique of stacking optimization gives high flexibility and mobility in work and allow overcoming the aforementioned problems. Easy choice of trace range weighting criteria based on customer attribute set analysis gives wide opportunities of fine-tuning for this procedure, bringing in interpretation term of stack optimization process and making it more sensible in geological-geophysical relation. This technique need not new software development and testing, it could be embodied in existing seismic software suites, including Russian complexes.

Keywords: exploration seismology, processing, signal, noise, stacking, matrix, weight, traceability.

For citation: Drobinskiy A. A., Zhukovskaya O. A. Local CMP stacking improvement technique for better traceability of separate reflection horizon. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): 103 – 117. DOI: 10.46698/VNC.2021.13.51.008.

Введение

Вопрос оптимизации суммирования при получении сейсмических разрезов по данным МОВ-ОГТ исследуется практически с самого времени появления метода общей глубинной точки. Работы в этом направлении известны как за рубежом, так и в нашей стране [Сагалова и др., 1970; Robinson, 1970]. Однако, стоит отметить, что в отечественной литературе оптимизации этого вида суммирования посвящено меньше внимания, особенно, в последние годы. Российские авторы в большей мере

сосредоточили свои усилия на вопросах улучшения вертикального суммирования накоплений при полевых работах с невзрывными источниками [Денисов, 2011; Череповский, Гафаров, 2013; Череповский, 2011]. Тем не менее, направление улучшения качества результирующих разрезов путём повышения эффективности работы процедуры суммирования ОСТ остаётся актуальным, и исследователи продолжают работать в этом направлении [Романов, 2015; Yadav et al., 2020].

Суммирование по более эффективным алгоритмам, позволяющим распознавать и учитывать качество подаваемых на его вход данных, может быть особенно востребованным в последние годы. Всё большее число объектов сейсморазведочных работ приходится на зоны сложных сейсмогеологических условий, фактические сроки работсокращаются, отмечается рост нестабильности климатических условий [Кузнецов и др., 2021; Левицкий и др., 2019]. При этом качество данных может существенно изменяться от одного физического наблюдения к другому, а сложности геологического строения, связанные с приповерхностными аномалиями или рассеивающими, поглощающими участками в самом разрезе, могут драматически ухудшать результирующую волновую картину в целевых интервалах вплоть до полной потери прослеживаемости [Козырев и др., 2003; Притчетт, 1999; Yilmaz, 2001]. Преодолеть связанные с этим проблемы может разработка и внедрение удобной и надёжной для промышленного применения методики рационализации суммирования ОСТ.

Цель исследования

Цель настоящего исследования состоит в создании и тестировании гибкой, универсальной методики оптимизации суммирования ОСТ на конечной стадии полевой или камеральной обработки сейсмических данных МОВ-ОГТ 2D/3D для улучшения прослеживаемости отражающих горизонтов.

Важным критерием универсальности можно считать возможность реализации методики практически в любом обрабатываемом комплексе, включая и отечественные разработки, без необходимости написания нового ПО и доведения его до стадии коммерческого продукта, т.к. последнее требует существенных временных и материальных затрат и значительно отдаляет найденное решение от его практического применения [Yilmaz, 2001].

Требование гибкости подразумевает возможность индивидуальной работы с отдельными интервалами разреза или отражающими горизонтами так, чтобы не вносить никаких изменений в окружающую волновую картину выше и ниже зоны применения или за пределами рабочего полигона в плане. Выполнение такого требования позволяет избежать часто возникающих при работе альтернативного алгоритма получения суммы сомнений в сохранении истинного соотношения амплитуд, гарантированно оставляя его неизменным во всех зонах за пределами обрабатываемого интервала [Денисов, 2011; Денисов и др., 2005; Иванов, 2011; Sanchis, Hanssen, 2011]. Для достижения максимальной эффективности также полезно иметь возможность сочетать несколько различных приёмов оптимизации суммирования в одном прогоне вычислений.

Обеспечение гибкости также подразумевает возможность мгновенного тестирования широкого набора критериев определения весов входных трасс с оценкой результата «на лету». Это, по сути, вводит интерпретационную составляющую в процесс оптимизации суммирования и делает его более осмысленным не только с математической, но и с геолого-геофизической точки зрения.

Методы исследования

С целью оценки проблемы формирования зон низкой прослеживаемости и возможности снизить их негативное влияние с помощью рационализации суммирования было выполнено построение иллюминационной модели. Для этого был выбран отражающий горизонт под искажающим объектом и произведено прогнозирование значений реальной кратности, учитывающее траектории лучей падающих и отражённых волн. Для оценки влияния рассеивающих аномалий в ВЧР было проведено двумерное лучевое моделирование по упрощённой модели горизонтально-слоистого разреза, содержащей приповерхностную аномалию карстовой природы. Построенная модель была использована для получения синтетических сейсмограмм общего пункта возбуждения, как с влиянием данной аномалии, так и без неё, выполнено визуальное сопоставление полученных результатов.

Чтобы оценить потенциал применения предлагаемой методики были генерированы синтетические данные, содержащие сильные помехи различной природы, а также зону падения амплитуды полезного сигнала. По синтетическим данным было выполнено суммирование по стандартным и оптимизированному алгоритмам, проведена качественная и количественная оценка результата. Предлагаемая методика также опробована на реальных данных МОГТ-2D.

Для присвоения весов при тестировании предлагаемой методики оптимизации суммирования производился атрибутный анализ: использовались базовые параметры (например, удаление), рассчитывался и оценивался набор специальных пострассовых сейсмических атрибутов, вычисляемых в домене общей средней точки. Тестировались стандартные атрибуты (включая оценки на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) и корреляционные. Также производилась визуальная оценка.

Для моделирования и генерации синтетических данных, их обработки и оценки использовались ПО Seis Space (Halliburton), Opend Tect (dGBEarthSciences), для оценки систем наблюдения и моделирования использовалось ПО Mesa (GMG). Сборка вычислительных заданий (потоков) по предлагаемой методике оптимизации суммирования, расчёт атрибутов для присвоения весов, визуализация и количественная оценка суммотрасс выполнялись в ПО Seis Space (Halliburton).

Результаты исследования и их обсуждение

Снижение соотношения сигнал-помеха в сложных сейсмогеологических условиях – хорошо известная проблема качества сейсмических данных. Многие исследования, связанные с рационализацией процесса суммирования, строятся на оценке данного параметра для сейсмических трасс при определении весов [Хаттон, 1989; Anderson, Mcmechan, 1990, 2006; Rietsch, 2006]. Его, несомненно, необходимо учитывать, как важный критерий, особенно, для улучшения качества суммирования в нижних интервалах разреза, где уровень амплитуд случайного шума на исходной записи может значительно превышать уровень амплитуд отражённых волн. Однако не менее важным фактором является практическое отсутствие сигнала отражённых волн на протяжённых интервалах трасс выборок общих глубинных точек (ОГТ) (иногда – более половины их количества) по причине физической невозможности его регистрации из-за эффектов поглощения и рассеяния энергии упругих колебаний [Притчетт, 1999].

На рисунке 1 приводятся результаты оценки негативного влияния объекта сложной конфигурации, расположенного над целевым горизонтом, на распределе-

ние кратности ОГТ по последнему с помощью иллюминационного моделирования. Эрозионный врез (палеоканьон с активным развитием трещиноватости и крутыми склонами) по кровле высокоскоростных карбонатных отложений, расположен над целевым горизонтом, залегающим на глубине примерно 1200 м. Искажающее влияние данного объекта на траекторию лучей приводит к существенному искажению лучевой траектории. В результате нарушение кратности ОГТ наблюдается в размере до 50% от проектной. Зонам максимального снижения кратности (до уровня 100 и ниже) будут соответствовать выборки ОСТ, до половины трасс которых не будет содержать полезного сигнала в целевом интервале. Миграционные преобразования позволят улучшить это положение, но полностью компенсировать потерю энергии до суммирования не получится [Yilmaz, 2001; Sanchis, Hanssen, 2011; Zhou, 2014]. Ввиду того, что на реальных данных положение может быть ещё хуже по причине общего снижения уровня сигнала в нижней части разреза и низкого соотношения сигнал-шум, снижение кратности может привести к образованию участков слепых зон [Дробинский и др., 2020]. Преодолеть этот отрицательный эффект можно путём оптимизации суммирования, например, снизив вес для трасс в выборках ОСТ, на которых практически отсутствует полезный сигнал.

На рисунке 2 приводится горизонтально-слоистая модель осадочного терригенно-карбонатного разреза, в целом, достаточно благоприятная для исследований

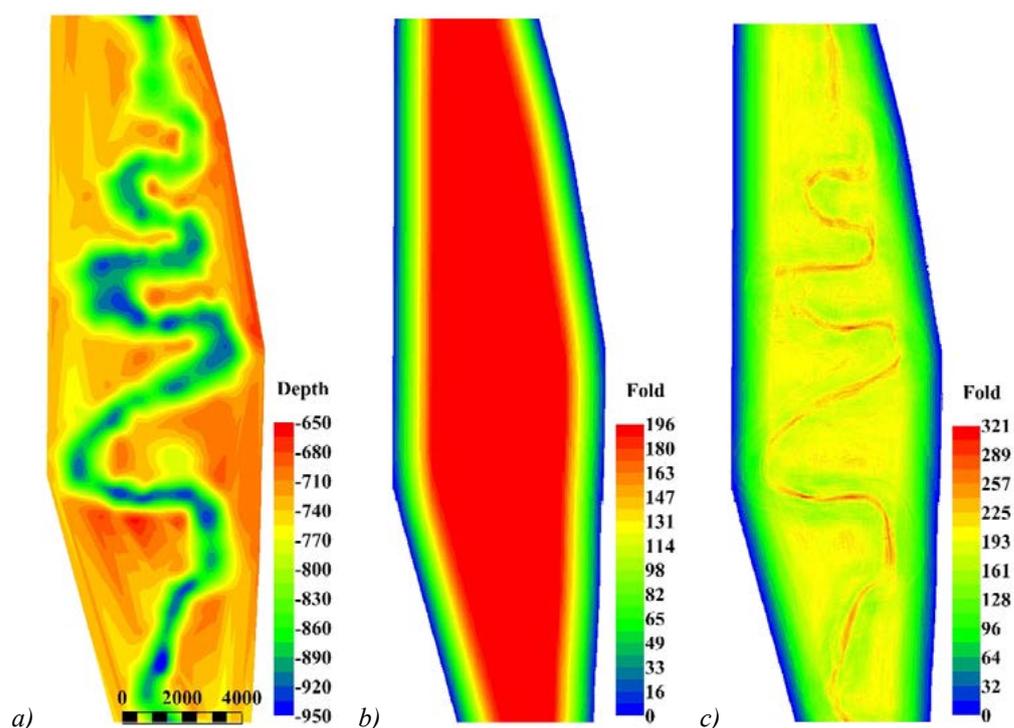


Рис. 1. Схема влияния эрозионного вреза неглубокого залегания на распределение кратности съёмки МОГТ-3D для нижележащего отражающего горизонта (шкалы: Depth – альтитуда горизонта в метрах, Fold – кратность): a – структурная схема эрозионного вреза; b – теоретическая кратность ОГТ для нижележащего горизонта (глубина 1200 м); c – фактическая кратность ОГТ для нижележащего горизонта по данным иллюминационного моделирования / Fig. 1. The sketch of superficial erosive cut influence on 3D seismic survey fold distribution for lower reflection horizon (color scales: Depth – horizon altitude (meters), Fold – CMP fold): a – outline of erosive cut structure; b – theoretical fold for lower horizon (depth 1200 m); c – fact fold for lower horizon according to illumination modeling

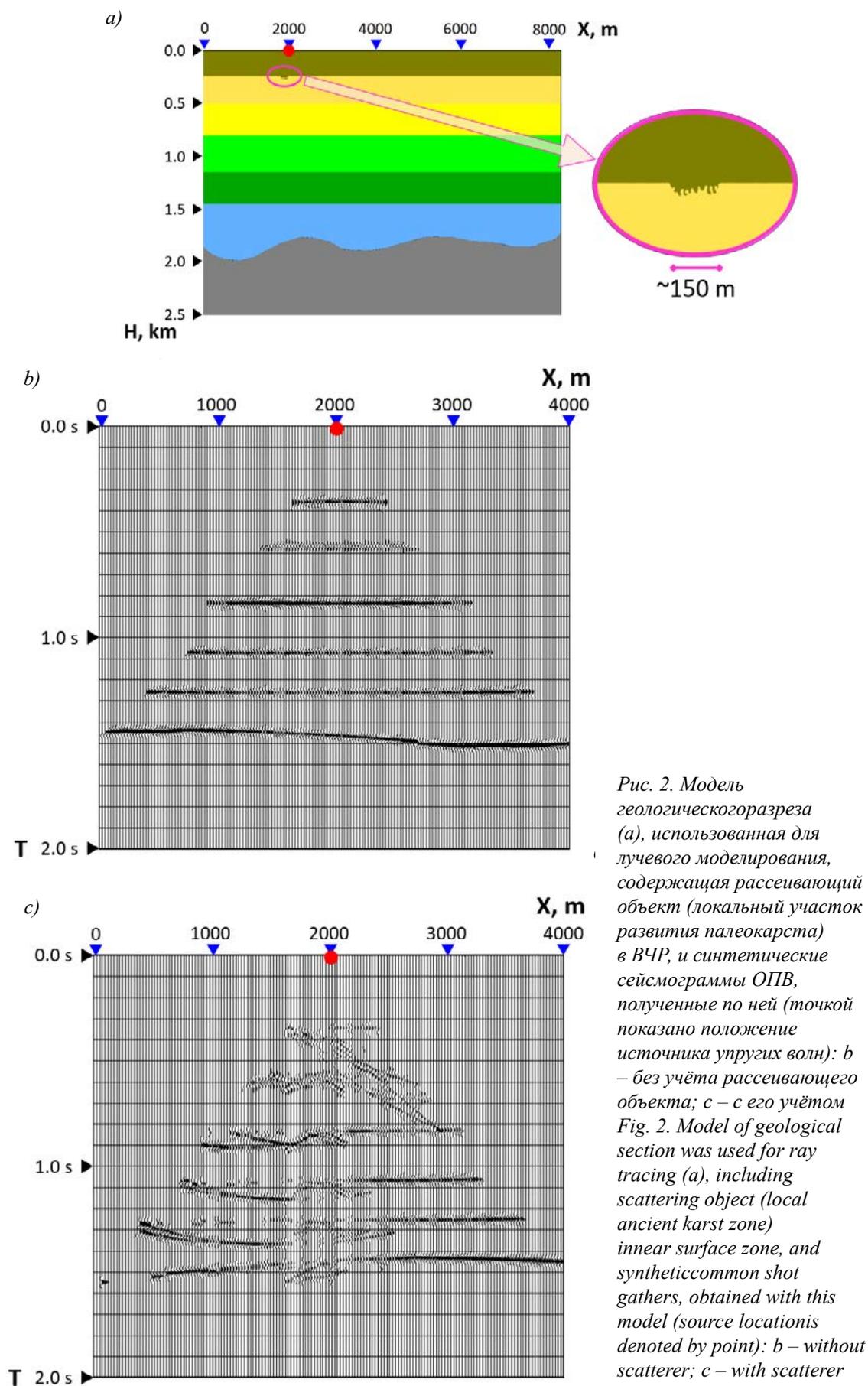


Рис. 2. Модель геологического разреза (а), использованная для лучевого моделирования, содержащая рассеивающий объект (локальный участок развития палеокарста) в ВЧР, и синтетические сейсмограммы ОПВ, полученные по ней (точкой показано положение источника упругих волн): b – без учёта рассеивающего объекта; c – с его учётом
Fig. 2. Model of geological section was used for ray tracing (a), including scattering object (local ancient karst zone) in near surface zone, and synthetic common shot gathers, obtained with this model (source location is denoted by point): b – without scatterer; c – with scatterer

МОВ-ОГТ. Приповерхностный слой представлен супесями и суглинками (скорость продольных волн 1400 м/с). Коренные породы представлены карбонатами (скорость продольных волн 2400 м/с). Для оценки возможного негативного влияния геологических аномалий ВЧР на регистрируемое волновое поле на времени около 200 мс был введён проблемный участок – зона палеокарста протяжённостью около 150 м на границе двух вышеуказанных слоёв. Известно, что области развития приповерхностного карста могут приводить к образованию протяжённых зон практически нулевого прослеживания на целом суммарном разрезе [Козырев и др., 2003; Притчетт, 1999; Yilmaz, 2001]. По рассматриваемой модели были получены синтетические сейсмограммы общего пункта возбуждения (активная расстановка: 161 пункт приема (ПП) через 25 м, удаление 2000 м, запись до 2 с) для варианта с рассеивающим объектом и без него. Хорошо видно, что значительное число трасс на сейсмограмме с «точечным карстом» содержит сильно искажённый сигнал или же сигнал практически отсутствует. Возможность исключить эти части трасс (или снизить их вес) при суммировании позволит существенно улучшить прослеживаемость целевых горизонтов в подобных условиях.

Обзор существующих подходов к оптимизации суммирования. В существующих работах можно выделить два основных подхода к определению весов данных для оптимизации суммирования ОСТ: на основе оценки качества отдельных трасс (по соотношению сигнал/помеха, уровню шума, затуханию и т. п.) [Anderson, McMechan, 1990, 2006; Rietsch, 2006, Robinson, 1970] и на основе сходства каждой отдельной трассы с эталонной модельной трассой (в первую очередь, через ФВК) [Gimlin et al., 1986; Liu et al., 2009; Sanchis, Hanssen, 2011, Robinson, 1970]. Следует отметить, что часть исследователей сфокусировалась в большей мере на создании алгоритмов определения весов [Stefanou, Manolis, 2007; Tyarkin, Ursin, 2005; White, 2006; Yadav et al., 2020], другая – на разработке методик определения весов с использованием уже существующих подходов и алгоритмов [Liu et al., 2009; Sanchis, Hanssen, 2011].

Общими недостатками методов, основанных на оценке трассы целиком, является невозможность учёта изменения качества записи во времени. Трасса получает общий вес для всех принадлежащих ей дискретов. Это позволяет исключить плохие трассы, но не даёт возможности учесть влияние переменных по времени негативных факторов, например, ослабление сигнала по геологическим причинам в отдельных интервалах. Предлагаемые корреляционные методы требуют создания эталонной трассы для каждой выборки ОСТ и последующей локальной корреляции отдельных трасс с ней, что достаточно эффективно, но мало применимо в зонах с почти полной потерей прослеживаемости [Liu et al., 2009; Sanchis, Hanssen, 2011].

Существенным недостатком предлагаемых корреляционных методов является потеря соотношения амплитуд по латерали и вертикали или необходимость сглаживания по разрезу после применения, что также отрицательно сказывается на естественной динамике волновой картины, хотя по этому вопросу мнение исследователей неоднозначно [Денисов, 2011; Иванов, 2011; Sanchis, Hanssen, 2011]. Наиболее результативные корреляционные методики, к сожалению, не предусматривают возможности применения в узко заданном интервале, о чём упоминают и сами их разработчики, указывая на этот недостаток в качестве предмета для проработки в будущем [Sanchis, Hanssen, 2011].

Предлагаемая методика оптимизации суммирования и её применение. Предлагаемая авторами методика предусматривает как новый подход к определению весов, так и принципиально иную схему применения рационального суммиро-

вания по сравнению с ранее освещёнными в научных работах. В настоящее время при интерпретации сейсмических данных для динамического анализа как после, так и до суммирования активно и успешно применяется широкий набор сейсмических атрибутов. Если попытаться подобрать перечень атрибутов и оценить их распределение, связав его с уровнем и качеством сейсмического сигнала в заданном диапазоне данных, то можно взвесить данные в соответствии с результатами такой оценки. Трассы с низким уровнем оценки получают минимальные веса, с высоким – максимальные. Сложностью такого подхода является необходимость тестирования и оценки влияния на качество суммирования широкого набора параметров. С одной стороны, это требует дополнительных затрат труда и машинного времени, с другой – означает появление интерпретационной составляющей и возможности осознанно и обоснованно с точки зрения геолого-геофизического анализа оптимизировать процесс получения суммы.

В ходе исследования тестировался широкий набор «низкоуровневых» сейсмических атрибутов, обычно получаемых на стадии обработки, включающий более 50 параметров, среди которых наибольшую эффективность при оценке весов в процессе суммирования показали следующие: доминирующая частота, средняя максимальная общая амплитуда, средняя и максимальная общая энергия, сила отражения, смещение корреляционного максимума (от горизонта), относительная мера корреляции, коэффициент ковариации, корреляционные компоненты, среднее соотношение сигнал/помеха. Ввиду высокого разнообразия потенциально применимых атрибутов исследование их применения для рационализации суммирования продолжается авторами и, разумеется, может быть развито любыми заинтересованными геофизиками. Проводилось тестирование и базовых атрибутов, в первую очередь, геометрических, среди которых удаление, например, позволяет очень гибко управлять базой суммирования по отдельным горизонтам.

При разработке методики вычисления весов было заложено главное требование: возможность использовать широкий и гибко настраиваемый набор критериев оценки (а не 1-2, как в большинстве ранее проведённых работ). Результатом стали система поиска отклонения от нормального значения и принцип весового штрафа по отклонению. Система поиска отклонения состоит в самом простом случае в поиске «нормального» (медианного, среднего или усечённого среднего) значения оцениваемого параметра по всем трассам выборки ОСТ. Далее из значения параметра для каждой трассы вычитается найденное нормальное значение, разница берётся по модулю (необязательно) и делится на нормальное значение, в результате чего получается относительное значение отклонения. В зависимости от значения отклонения, вес интервала трассы получает штраф. Например, штраф 25% означает умножение входного веса на 0,75; штрафы 10, 15, 20% по трём параметрам дадут коэффициент снижения веса, являющийся произведением 0,9; 0,85 и 0,8, т.е. 0,612. Принципиальный граф специальной обработки для этой цели показан на рисунке 3.

Задача интерпретации входных параметров и выходных результатов сводится к подбору ключевых триггеров (атрибутов) для снижения весов, определения адекватных диапазонов отклонений и соответствующих им штрафов. Для решения ряда противоречий и сложно увязываемых требований к процессу оптимизации суммирования был разработан подход раздельной обработки данных и коэффициентов их взвешивания путём генерации и модификации сейсмограммы-матрицы единичных весов.



Рис. 3. Блок-схема принципиального графа специальной обработки для проведения оптимизированного суммирования (последовательность – в порядке возрастания номера, стрелками показано движение входных/выходных данных) /
 Fig. 3. The chart of special processing sequence for optimized stacking (execution order match with the number, input/output data flows is marked by arrows)

Принцип такого подхода достаточно прост: на основе реальных данных создаётся полностью идентичный по геометрии, количеству трассы отсчётов набор, но значения всех его дискретов принимаются равными 1, зона мьютинга обнуляется. Если прогнать данные по показанному выше графу без каких-либо модификаций единичной сейсмограммы-матрицы весов, то на выходе будет получен обычный суммарный разрез, без каких-либо изменений волновой картины. Модификация любого выбранного участка сейсмограммы-матрицы позволяет управлять весами данных перед суммированием сколь угодно гибко. Это даёт ряд преимуществ:

1. Работа с отдельным интервалом или отражающим горизонтом, без внесения каких-либо изменений в динамику волновой картины остальной части разреза.

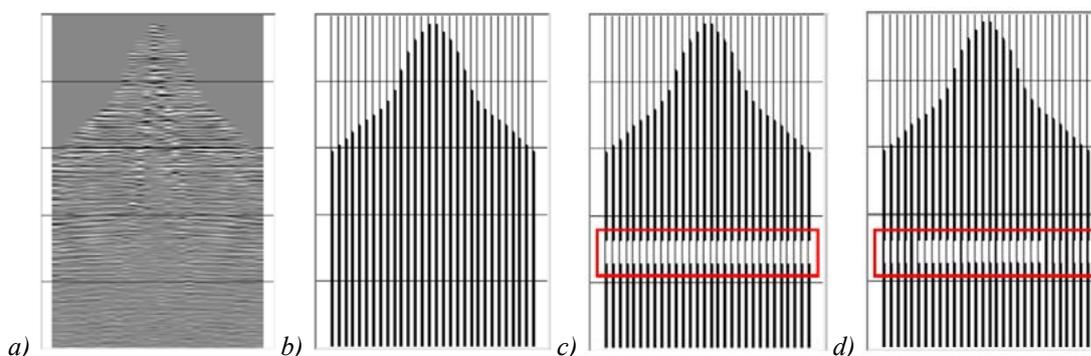


Рис. 4. Схема построения весовой матрицы для оптимизации суммирования на основе исходной сейсмограммы ОСТ: а – исходная сейсмограмма; б – сейсмограмма-матрица единичных весов; в – обнуление весов в целевом интервале; д – назначение весов в финальной сейсмограмме-матрице весов /
 Fig. 4. The sketch of weight matrix building based on initial CMP gather: а – initial gather; б – unit weights matrix gather; в – weights zeroing in target range; д – final matrix gather weights assignment

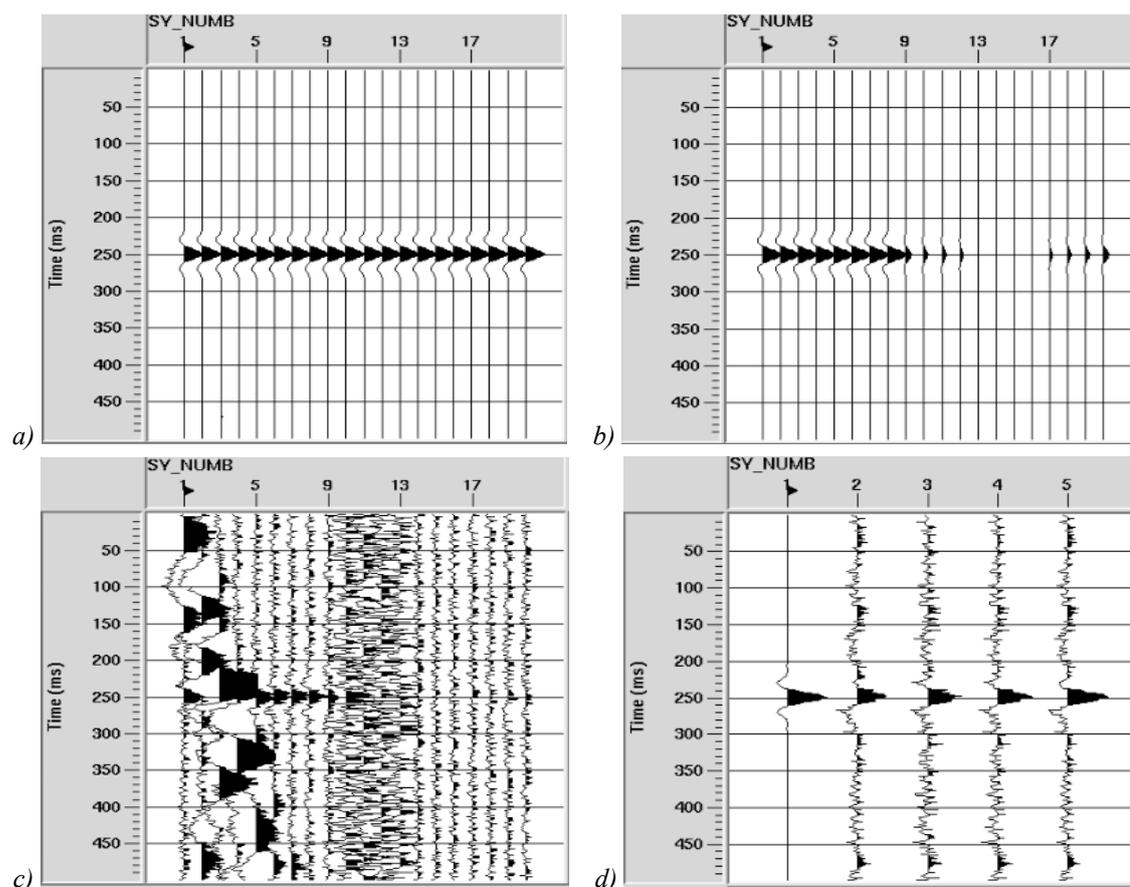


Рис. 5. Результаты тестирования различных методик суммирования ОСТ на синтетических данных: а – трассы с синтетическим сигналом Ормсби (введены кинематические поправки); б – трассы (а) с вводом зоны ослабления сигнала; в – трассы (б) с добавлением помех; д – суммотрассы, полученные: 1 – по (б) стандартным суммированием, 2 – по (в) стандартным суммированием, 3 – по (в) медианным суммированием, 4 – по (в) по усечённому среднему; 5 – по набору (в) оптимизированным суммированием

Fig. 5. The results of different CMP stacking methods examination on synthetic data: a – traces with synthetic Ormsby impulse (NMO'ed); b – traces (a) with zone of signal decay; c – traces (b) with addition of different noise; d – stacked traces, obtained: 1 – with (b) by conventional stacking, 2 – with (c) by conventional stacking, 3 – with (c) by median stacking, 4 – with (c) by alpha-trim mean, 5 – with (c) by optimized stacking

2. Можно комбинировать сразу несколько методик оптимизации суммирования, применяя их к одной и той же матрице весов, например, снизив вес трасс меньших удалений в нижней части разреза для лучшего подавления кратных волн и также применить оптимизацию суммирования по атрибутам в нужных интервалах.

3. Индивидуальное управление базой суммирования для отдельных горизонтов на основе изучения наборов прогрессивного мьютинга.

4. Контроль изменения динамики интервала применения путём сравнения с остальной волновой картиной на том же самом разрезе (т. е. с областями, где методика не применялась).

5. Вспомогательные «технические» процедуры, работа которых зависит от амплитуд, например, сглаживание ступени интервала применения, не нужно проводить по исходным данным. Их достаточно применить к матрице весов в целевом интервале. Это также защищает данные от искажений амплитуд по латерали и по времени.

6. Вес получают лишь интервалы трасс (сколь угодно узкие), нет необходимости определять вес для всей трассы целиком.

На рисунке 4 показаны стадии формирования финальной матрицы весов, соответствующей процедуре 5 графа специальной обработки, показанного на рисунке 3.

Для оценки возможностей предлагаемой методики оптимизации суммирования ОСТ были сгенерированы синтетические данные, имитирующие одиночное отражение на 20-кратной выборке ОСТ (рис. 5). Набор получен с импульсом Ормсби 4-8-30-40 Гц длительностью 100 мс, кинематика введена. Для создания волновой картины, соответствующей регистрации в сложных геолого-геофизических условиях, в набор была введена зона ослабления сигнала (рис. 5б), добавлены поверхностная волна (5 составляющих), повышенный уровень случайного шума, область сильно шумящих каналов (каналы 10-13). По набору, представленному на рисунке 5б, была получена эталонная трасса, с которой можно сравнить суммотрассы медианного, по усечённому среднему (уровень 50%) и оптимизированного суммирования (рис. 5г).

Визуальная оценка показывает, что стандартное суммирование по среднему даёт самый слабый результат, медианное – демонстрирует улучшение, суммирование по усечённому среднему показывает самую качественную суммотрассу из стандартных методов. Применение методики оптимизации суммирования позволяет поднять уровень сигнала на уровень выше эталонной трассы за счёт снижения веса трасс с ослаблением сигнала (каналы 8-20). Форма сигнала для последнего варианта, как и видимая частота, оказались наилучшими.

В таблице 1 приводятся количественные (атрибутивные) оценки, сделанные по суммотрассам, показанным на рисунке 5 г. Количественные оценки, в целом, совпадают с визуальными: более высокие показатели из стандартных методов, как по энергии, так и по частоте, характерны для суммирования по медиане и по усечённому

Таблица 1 / Table 1

Результаты количественной (атрибутивной) оценки различных вариантов суммирования ОСТ, выполненных по синтетическим данным (номер варианта суммирования соответствует номеру трассы на рисунке 1d) / The results of quantitative (attribute) evaluation of different CMP stacking techniques, performed on synthetic data (stacking version number match the number on fig. 1d)

<i>Вариант суммирования / Summary variant</i>	<i>Average Energy</i>	<i>Total Amplitude</i>	<i>Average Energy</i>	<i>Average Reflect Strength</i>	<i>Signal/ Noise</i>	<i>Dominant Frequency</i>
1 – Суммирование по среднему без помех / Summation over a noise-free mean	0,6	7,0	0,6	1,0	-	30,0
2 – Суммирование по среднему / Summation over a mean	0,4	5,3	0,4	0,8	4,5	28,2
3 – Медианное суммирование / Median summation	0,5	5,6	0,5	0,9	5,0	27,6
4 – Суммирование по усечённому среднему / Summation over a trimmed mean	0,5	5,7	0,5	0,9	5,8	28,7
5 – Суммирование с оптимизацией / Summation with an optimization	0,7	8,2	0,7	1,1	7,2	29,6

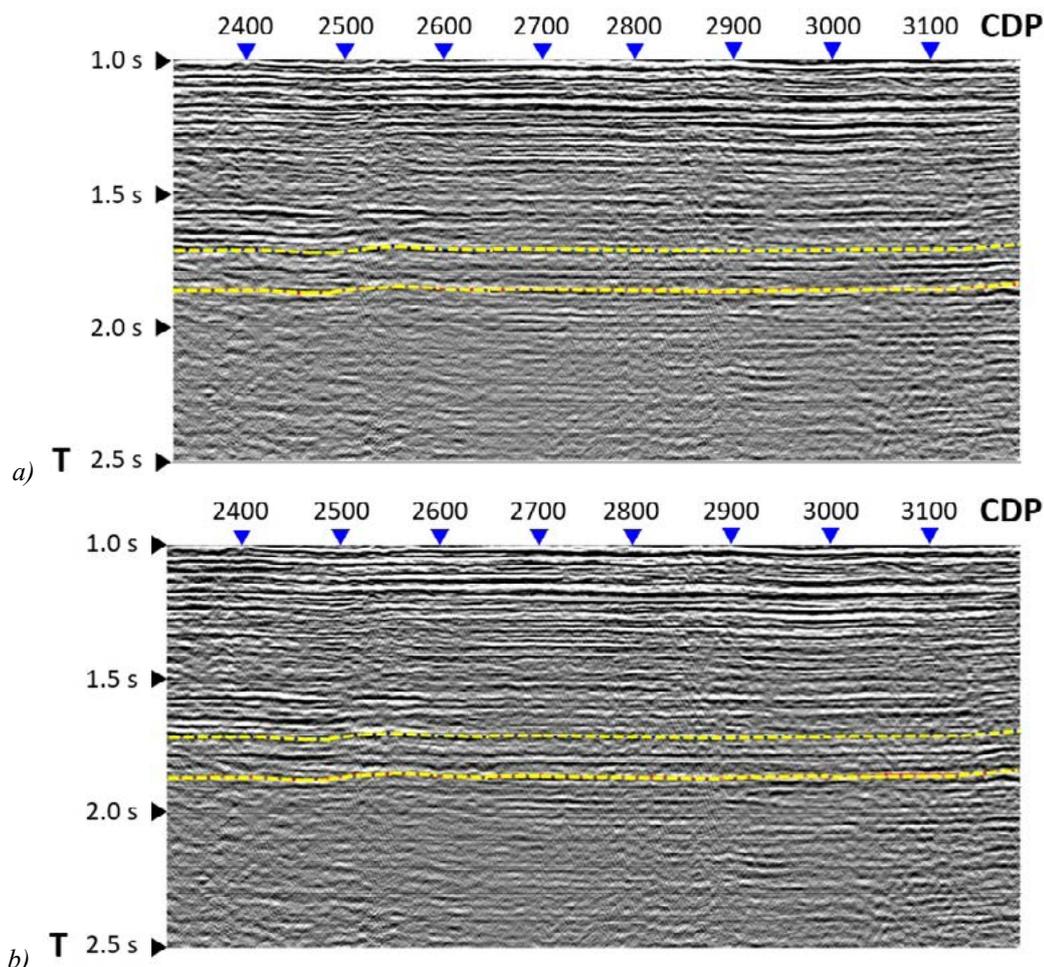


Рис. 6. Фрагмент сейсмического разреза, полученного: а – со стандартным суммированием ОСТ; б – с оптимизированным суммированием ОСТ; оптимизация сделана по горизонту на времени ~1,8 с /
Fig. 6. The part of seismic section, obtained with: a – conventional CMP stacking; b – optimized CMP stacking; optimization performed on ~1.8 s horizon

му среднему. Наилучшими показателями характеризуется суммотрасса 5, полученная с оптимизацией суммирования. Её энергетические показатели даже превышают эталонные значения, из-за учёта зоны падения уровня сигнала.

Для опробования предлагаемой методики на реальных данных был выбран сейсмический профиль, полученный в сложных условиях в северной части Прикаспийской впадины. Обработка проведена с минимальным применением процедур шумоподавления и с сохранением соотношения амплитуд. Оптимизированное суммирование по предлагаемой методике применялось к временному интервалу, соответствующему отражающему горизонту с нарушением прослеживаемости. Фрагмент суммарной волновой картины, полученный по стандартной и оптимизированной методикам суммирования, представлен на рисунке 6.

Можно отметить, что оптимизированное суммирование позволило улучшить прослеживаемость горизонта и получить непрерывную устойчивую ось синфазности по верхнему положительному максимуму в промежутке ОГТ 2500-3200. Осложнения волновой картины в области ОГТ 2500 (разрывное нарушение) и в интервале ОГТ 2300-2500 также стали видны значительно отчётливее и контрастнее. Динамика и рисунок отражений выше и ниже интервала применения не измени-

лись. Количественная оценка показала увеличение соотношения сигнал-помеха в 1,87 раза, силы отражений (reflectionstrength) в 1,33 раза для последнего варианта обработки (рис. 6б).

Выводы

Проведённое исследование показало, что стандартное суммирование ОСТ, выполняемое по данным МОВ-ОГТ, полученным в сложных сейсмогеологических условиях, может быть недостаточно эффективно, особенно, в зонах потери сигнала на части трасс из-за влияния приповерхностных или глубинных объектов, искажающих и рассеивающих энергию упругих сейсмических колебаний.

Некоторые из существующие методов оптимизации суммирования дают существенное улучшение волновой картины, вплоть до появления ранее не различимых отражений, но имеют ряд проблем: нарушение соотношения динамики, невозможность применения поинтервалам, учёт малого числа параметров для назначения весов, невозможность комбинирования нескольких алгоритмов.

Предлагаемая авторами методика оптимизации суммирования даёт высокую гибкость и маневренность работы и позволяет справиться с вышеуказанными недостатками. Свободный выбор критериев взвешивания интервалов трасс на основе анализа пользовательского набора атрибутов открывает широкие возможности тонкой настройки процедуры, вводит интерпретационную составляющую в процесс оптимизации суммирования, делая его более осмысленным в геолого-геофизическом отношении. Проведённые тесты на синтетических и реальных данных подтверждают качественное и количественное улучшение волновой картины в результате оптимизации суммирования.

Важным достоинством методики является то, что она не требует написания и опробования нового специального ПО, а может быть реализована в имеющихся сейсмических программных пакетах, включая отечественные, что позволяет заинтересованным геофизикам приступить к её тестированию и применению практически сразу после изучения.

Литература

1. Денисов М. С. О выборе весов при суммировании сейсмических трасс. Комментарий к статье А. В. Череповского. // Геофизика. – 2011. – № 1. – С. 22-26.
2. Денисов М. С., Фиников Д. Б. Способ подавления шумов дискретизации при суммировании сейсмических трасс. // Геофизика. – 2005. – № 1. – С. 12-16.
3. Дробинский А. А., Гольчикова Н. Н., Камнев П. П. Особенности строения и перспективы нефтегазоносности палеоканала, выявленного по данным МОГТ в восточной части Каракульско-Смушковской зоны поднятий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – № 10 (3). – С. 114-126. DOI: 10.46698/VNC. 2020.13.71.007
4. Иванов А. И. Комментарий к статье А. В. Череповского «Подавление нестационарных помех путём весового вертикального суммирования и медианной фильтрации». // Геофизика. – 2011. – № 1. – С. 20-21.
5. Козырев В. С. Учёт неоднородностей верхней части разреза в сейморазведке. Современные технологии. / В. С. Козырев, А. П. Жуков, И. П. Коротков, А. А. Жуков, М. Б. Шнерсон. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 227 с.
6. Кузнецов Е. С., Баландин П. В., Дробинский А. А., Череповский А. В. Результаты анализа полевых данных OMP МОГТ-3D, полученных по технологии возбуждения сигнала в движении GLIDE. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2021. – № 1 (68). – С. 12-19.

7. Левицкий А. А., Рудаков А. В., Левицкая М. С. Специфика получаемого сейсмического материала в сложных сейсмогеологических условиях (заболоченная местность). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2019. – №9 (1). – С. 97-109. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26791
8. Романов В. В. Адаптивное суммирование при накоплении сейсмограмм. // *Приборы и системы разведочной геофизики*. – 2015. – №4. – С. 60-63.
9. Сагалова Е. И., Червонский М. И. Способ суммирования сейсмических сигналов. // *УкрНИГРИ*. – 1970. – Бюл. 16. – С. 42.
10. Череповский А. В., Гафаров Р. М. Весовое суммирование как редактор нестационарных помех в невзрывной сейсморазведке. // *Геофизика*. – 2013. – Вып. 2. – С. 70-75.
11. Череповский А. В. Подавление нестационарных помех путём весового вертикального суммирования и медианной фильтрации. // *Геофизика*. – 2011. – Вып. 1. – С. 14-19.
12. Притчетт У. К. Получение надёжных данных сейсморазведки. / Пер. с англ. В. П. Номоконова, М. Б. Шнеерсон. – М.: Мир, 1999. – 448 с.
13. Хаттон Л. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. / Л. Хаттон, Дж. Мейкин, М. Уэрдингтон. Пер. с англ. под ред. А. Л. Малкина. – М.: Мир, 1989. – 216 с.
14. Anderson R. G., McMechan G. A. Automatic editing of noisy seismic data. // *Geophysical Prospecting*. – 2006. – No. 37 (8). – pp. 875-892.
15. Anderson R. G., McMechan G. A. Weighted stacking of seismic data using amplitude decay rates and noise amplitudes. // *Geophysical Prospecting*. – 1990. – Vol. 38. – pp. 365-380.
16. Gimlin D. R., Keener M., Lawrence J. F. Maximum likelihood stacking in white Gaussian noise with unknown variance. // *IEEE Transact. on Geoscience and Rem. Sen.* – 1982. – Vol. 20. Iss. 1. – pp. 91-98.
17. Liu G., Fomel S., Jin L., Chen X. Stacking seismic data using local correlation. // *Geophysics*. – 2009. – Vol. 74. No. 3. – pp. V43 – V48.
18. Rietsch E. Estimation of the signal-to-noise ratio of seismic data with an application to stacking. // *Geophysical Prospecting*. – 2006. – No. 28 (4). – pp. 531-550.
19. Robinson J. C. Statistically optimal stacking of seismic data. // *Geophysics*. – 1970. – Vol. 35. Iss. 3. – pp. 387-522.
20. Sanchis C., Hanssen A. Enhanced local correlation stacking method. // *Geophysics*. – 2011. – Vol. 76. No. 3. Iss. 1. – pp. V33 – V45.
21. Stefanou G., Manolis P. Spectral representation versus Karhunen-Loeve expansion for the simulation of stochastic fields: a comparative study. // 8th HSTAM International Congress on Mechanics. – 2007. – pp. 75-82.
22. Tyapkin Y., Ursin B. Optimum stacking of seismic records with irregular noise. // *Geophysics and Engineering*. – 2005. – No. 2. – pp. 177-187.
23. White R. E. The performance of optimum stacking filters in suppressing uncorrelated noise. // *Geophysical Prospecting*. – 2006. – Iss. 25 (1). – pp. 165-178.
24. Yadav D. K., Manpura A. K., Patney R. K. Stacking Seismic Data Based on Ramanujan Sums. // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2020. – Vol. 17. Iss. 9. – pp. 1633-1636.
25. Yilmaz O. Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. // *Society of Exploration Geophysicists* – 2001. – 2038 p.
26. Zhou H.-W. Practical seismic data analysis. // Cambridge University Press. – 2014. – 510 p.

References

1. Denisov M. S. On the choice of weights of stacking the seismic traces. Comments to the article by A. V. Cherepovskiy. *Geophysics*, 2011. Iss. 1. pp. 22-26. (In Russ.)
2. Denisov M. S., Finikov D. B. A method of sampling noise attenuation when seismic traces stacking. *Geophysics*, 2005. Iss. 1. pp. 12-16. (In Russ.)
3. Drobinskiy A. A., Golchikova N. N., Kamnev P. P. Structure features and oil and gas prospect of paleochannel revealed with 2D seismic data in The East of Karakulsko-Smushkovskaya uplift

zone. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Iss. 10 (3). pp. 114-126. DOI: 10.46698/VNC.2020.13.71.007 (In Russ.)

4. Ivanov A. I. Comments to the article by A. V. Cherepovskiy: Suppression of non-stationary noise by the weighted vertical summation and median filtering. *Geophysics*, 2011. Iss. 1. pp. 20-21. (In Russ.)

5. Kozyrev V. S., Zhukov A. P., Korotkov I. P., Zhukov A. A., Shneerson M. B. Accounting of up part of section in prospecting seismology. *Modern Technologies*. Moscow. LLC Nedra-Businesscenter, 2003. 227 p. (In Russ.)

6. Kuznetsov E. S., Balandin P. V., Drobinskiy A. A., Cherepovskiy A. V. Analysis of 3D research-methodical works seismic data, obtained with GLIDEtechnology. *Devices and syst. of explor. Geophysics*, 2021. Iss. 1 (68). pp. 12-19. (In Russ.)

7. Levitskiy A. A., Rudakov A. V., Levitskaya M. S. Specificity of the seismic material obtained in complex seismo geological conditions (swamp zone), 2019. Iss. 9 (1). pp. 97-109. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26791 (In Russ.)

8. Romanov V. V. Adaptive stacking when seismograms summing. *Devices and syst. of explor. Geophysics*, 2015. Iss. 4. pp. 60-63. (In Russ.)

9. Sagalova E. I., Chervonskiy M. I. The method of seismic signal stacking. *UkrSRMI*, 1970. Bull. 16. pp. 42. (In Russ.)

10. Cherepovskiy A. V., Gafarov R. M. Diversity stack as an editor of non-stationary noise in nonexplosive seismic. *Geophysics*, 2013. Iss. 2. pp. 70-75. (In Russ.)

11. Cherepovskiy A. V. Suppression of non-stationary noise by the weighted vertical summation and median filtering. *Geophysics*, 2011. Iss. 1. pp. 14-19. (In Russ.)

12. Pritchett W. C. *Acquiring Better Seismic Data*. Translate from English of Nakomova V. P., Shneerson M. B. Moscow. Mir, 1979. 256 p. (In Russ.)

13. Hatton L., Makin J., Worthington M. *Seismic data processing. Theory and practice*. Translate from English under redaction of Malkin A. L. Moscow. Mir, 1989. 216 p. (In Russ.)

14. Anderson R. G., McMechan G. A. Automatic editing of noisy seismic data. *Geophysical Prospecting*, 2006. No. 37 (8). pp. 875-892.

15. Anderson R. G., McMechan G. A. Weighted stacking of seismic data using amplitude decay rates and noise amplitudes. *Geophysical Prospecting*, 1990. Vol. 38. pp. 365-380.

16. Gimlin D. R., Keener M. S., Lawrence J. F. Maximum likelihood stacking in white Gaussian noise with unknown variance. *IEEE Transact. on Geoscience and Rem. Sen.*, 1982. Vol. 20. Iss. 1. pp. 91-98.

17. Liu G., Fomel S., Jin L., Chen X. Stacking seismic data using local correlation. *Geophysics*, 2009. Vol. 74. No. 3. pp. V43-V48.

18. Rietsch E. Estimation of the signal-to-noise ratio of seismic data with an application to stacking. *Geophysical Prospecting*, 2006. No. 28 (4). pp. 531-550.

19. Robinson J. C. Statistically optimal stacking of seismic data. *Geophysics*, 1970. Vol. 35. Iss. 3. pp. 387-522.

20. Sanchis C., Hanssen A. Enhanced local correlation stacking method. *Geophysics*, 2011. Vol. 76. No. 3. Iss. 1. pp. V33-V45.

21. Stefanou G., Manolis P. Spectral representation versus Karhunen-Loeve expansion for the simulation of stochastic fields: a comparative study. 8th HSTAM International Congress on Mechanics, 2007. pp. 75-82.

22. Tyapkin Y., Ursin B. Optimum stacking of seismic records with irregular noise. *Geophysics and Engineering*, 2005. No. 2. pp. 177-187.

23. White R. E. The performance of optimum stacking filters in suppressing uncorrelated noise. *Geophysical Prospecting*, 2006. Iss. 25 (1). pp. 165-178.

24. Yadav D. K., Manpura A. K., Patney R. K. Stacking Seismic Data Based on Ramanujan Sums. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020. Vol. 17. Iss. 9. pp. 1633-1636.

25. Yilmaz O. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of Exploration Geophysicists, 2001. 2038 p.

26. Zhou H.-W. *Practical seismic data analysis*. Cambridge University Press., 2014. 510 p.