

Разделение сигналов от перекрывающихся источников на примере синтетически смешанных данных морской сейсморазведки с донными станциями

■ Казанин Г.А.^{1,2}, Гайнанов В.Г.², Литвачук А.В.¹, Ткач В.С.¹

¹АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», Мурманск, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Методика проведения полевых работ с одновременным отстрелом площади несколькими перекрывающимися во времени источниками позволяет сократить затраты на выполнение полевых сейсмических работ за счет существенного ускорения выполнения съемки. Однако при этом на сейсмограммах интерферируют сигналы от нескольких единовременных возбуждений. Для разделения интерферирующих волновых полей требуется выполнение дополнительной предобработки зарегистрированных данных, что представляет собой достаточно сложную задачу. В данной статье описываются основные преимущества выполнения работ с перекрывающимися источниками и представлен алгоритм подавления интерференции, основанный на применении разреженной инверсии. Результаты применения указанного алгоритма продемонстрированы на синтетически смешанных данных 3D сейсморазведки, которые удалось разделить достаточно качественно.

Ключевые слова: сейсморазведка, перекрывающиеся источники, разреженная инверсия, шельф, деблендинг, мультиисточник, разделение сигналов.

Введение

В последние десятилетия применение методики выполнения полевых сейсморазведочных работ на шельфе с использованием нескольких перекрывающихся источников (так называемый *blended acquisition* или *simultaneous source acquisition*) набрало существенную популярность ввиду неоспоримых экономических и технологических преимуществ, которые дает применение данной методики. Так, благодаря использованию нескольких судов-источников возможно существенно сократить время выполнения полевых работ, и, следовательно, затраты на выполнение сейсмической съемки [10]. Кроме того, использование указанной методики дает возможность увеличить плотность пунктов возбуждения сигнала, что позволяет решить сложности, возникающие с пространственным алиасингом по источнику. Таким образом, применение перекрывающихся источников позволяет проявлять

гибкость при проектировании сейсмических работ как в сторону снижения затрат, так и в сторону увеличения количества ПВ и качества получаемого сейсмического материала (Рис. 1.) Особую популярность данная методика обрела при сейсморазведочных работах 3D-4C с донным сейсмическим оборудованием [2], где экономический эффект от применения нескольких источников может быть максимизирован. По расчетам, проведенным в АО «МАГЭ», стоимость дня работы полевой партии, выполняющей сейсморазведку 3D с донными станциями по классической методике и состоящей из одного-судна источника, двух судов-раскладчиков, судна-пингеровщика и судна снабжения составляет 1 условную единицу. Для выполнения расчетного объема работ потребуется 120 дней. В случае, если к полевой партии добавляется еще одно судно-источник, то стоимость дня работы возрастает до 1.15 условных единиц, но

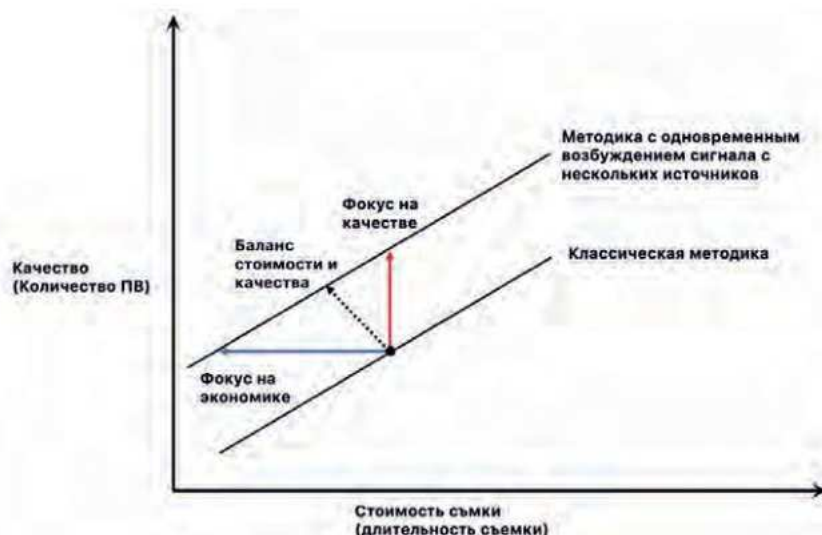


Рис. 1.
Схематическое сравнение стоимости и качества работ выполняемых по классической методике сейсморазведочных работ и по методике с перекрывающимся возбуждением сигнала [10].

при этом количество дней для выполнения аналогичного объема работ сокращается до 70. Следовательно затраты на выполнения работ с одним источником составят 120 у. е. против 80.5 у. е. для работ с двумя судами-источниками. Таким образом, при равном объеме сейсморазведочных работ 3D с донными станциями, использования двух-судов источников позволит сократить их стоимость на примерно на 33 %.

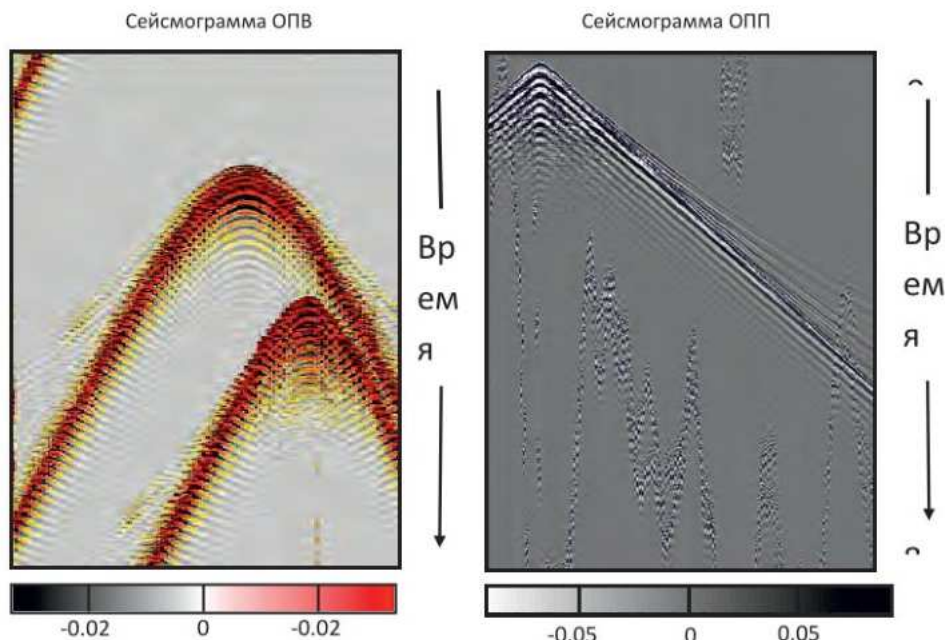
В отличие от классической методики выполнения сейсморазведочных работ, где возбуждение сигнала происходит последовательно, с такой задержкой, чтобы сигнал от последующего источника не интерферировал с сигналом от предыдущего источника, применение методики с перекрывающимися источниками приводит к появлению на сейсмограммах сигналов от нескольких источников, которые должны быть отделены друг от друга (Рис.2).

Задача подавления шума от возникающей интерференции является достаточно сложной и на сегодняшний день повсеместно используется подавление шума в сортировке общего пункта приема, так как возникающий шум в указанном домене представляется случайным, что открывает возможности для его

подавления различными стандартными методами. Исторически для подавления интерференции использовались различные техники шумоподавления, например, фильтрация с помощью медианного фильтра [1, 4, 5, 6, 7]. Однако данные методы не всегда позволяют восстановить сигнал от глубоких отражений и создают артефакты при применении. Другая группа методов для решения данной проблемы основана на применении разреженной (sparse) инверсии для разделения сигнала от разных источников [2, 10, 11]. Данный подход более надежен и приводит к более эффективному разделению полей и сохранению основного сигнала, а также к оптимизации рабочего процесса обработки таких данных [8].

В данной статье авторами предложено использовать метод разделения источников, основанный на разреженной инверсии, который был первоначально представлен [2; 10], и дополненный в работе [12] для выполнения задачи по отделению шума от перекрывающихся источников на синтетических смешанных данных сейсморазведки.

► Рис. 2. Пример сейсмограмм общего пункта взрыва (слева) и общего пункта приема (справа), полученных по результатам сейсмической съемки с перекрывающимися источниками. Источник – архив АО «МАГЭ».



Описание метода

Непрерывная сейсмическая запись с приемника, полученная по результатам работ с перекрывающимися источниками, может быть представлена в матричном виде следующим образом:

$$d = \Gamma m \quad (1)$$

где d – непрерывная сейсмическая запись приемника с сигналом от нескольких источников, Γ – матрица смешивания, m – сейсмические данные без шума от перекрывающихся источников.

Уравнение (1) представляет собой прямую задачу смешивания сейсмических данных, известные данные – это запись d и матрица смешивания Γ , которая показывает, как именно смешаны данные. Данная матрица сконструирована из информации о временах всех выстрелов, произошедших во время работ с несколькими источниками. Неизвестным выступает m , для которой необходимо решить данное уравнение. Задача прямой инверсии и нахождения данных без шума является некорректной и требует регуляризации в связи с тем, что строк в матрице d меньше, чем в матрице m . Для решения данной проблемы предложено использовать алго-

ритм итеративного жесткого порога (IHT или Iterative Hard Thresholding [3]), что эквивалентно нахождению решения следующей задачи оптимизации:

$$\tilde{m} = \min_d \frac{1}{2} \|d - \Gamma d\|_2^2 + \varepsilon \|S^H d\|_0 \quad (2)$$

где S^H – разреженное преобразование, ε – параметр регуляризации, который определяет степень разреженности в области решения задачи оптимизации.

В качестве разреженного преобразования из всех доступных в сейсморазведке преобразований, таких как F-K преобразование, преобразование Радона, сейслет и курвлет преобразование, авторами было выбрано оконное 3D преобразование Фурье. Оно является наиболее быстрым при применении и требует минимум параметризации (в отличие от преобразований Радона, которые требуют подбора наклона событий). Более того, на преобразование Фурье не влияет пространственный алиасинг, так как события, которые в области Фурье пространственно неоднозначны, остаются когерентными и разреженными в области Фурье и могут быть восстановлены инверсией [2]. Раз-

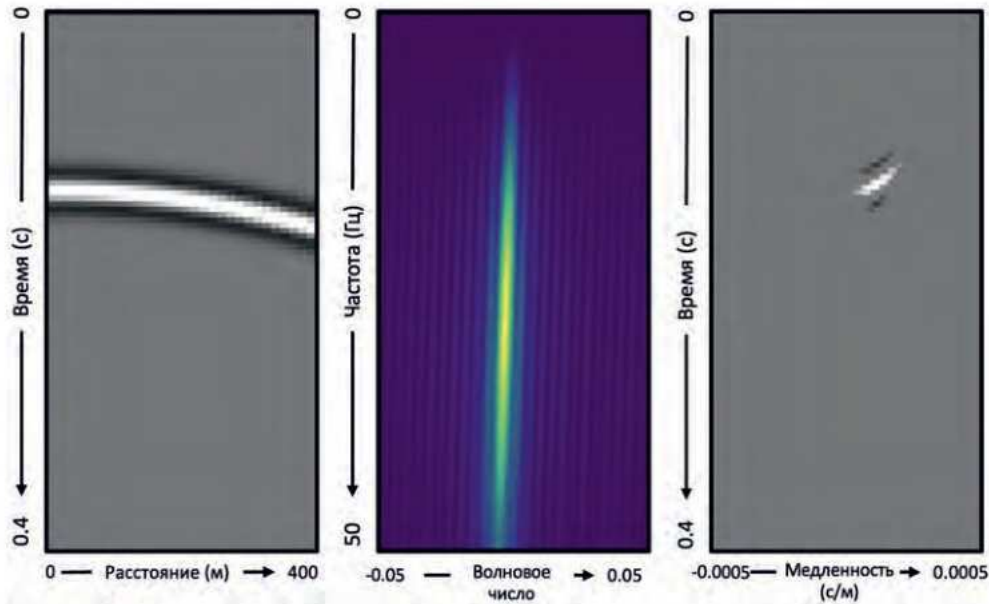


Рис. 3.
Синтетическая сейсмограмма (слева), F-K преобразование (по центру), линейное преобразование радона (справа).

реженные преобразования стремятся сконцентрировать сигнал от отражений (Рис. 3.) в одной точке, при этом шум от вторичных источников в области преобразования является некогерентным и не восстанавливается (моделируется) в процессе инверсии.

В целях демонстрации алгоритма разделения сигнала от нескольких источников ниже продемонстрировано выражение для одной i -той итерации инверсии:

$$\tilde{m}_{i+1} = (S^{-1}\tau_i S)(\tilde{m}_i + \Gamma^H(d - \Gamma \tilde{m}_i)) \quad (3)$$

где S^{-1} – обратное 3D преобразование Фурье, S – прямое 3D преобразование Фурье, Γ^H – транспонированная матрица смешивания, τ_i – оператор порогового значения.

В данной работе авторами был выбран жесткий частотно зависимый порог, где минимальные пороговые значения задаются для каждой частоты в зависимости от исходных данных [9]. Кроме этого, используется оконная версия преобразования Фурье, которая позволяет алгоритму локально применять преобразование в окнах, что существенно повышает разреженность данных в окне преобразования так как отраже-

ния в таких окнах можно аппроксимировать прямыми с небольшим наклоном. Соответственно, уравнение (3) дополняется следующим образом:

$$\tilde{m}_{i+1} = \sum_{j=1}^{n_w} M_j S_j^{-1} T_{\tau_i(\omega)} S_j W_j \{\tilde{m}_i + \alpha \Gamma^H d - \Gamma \tilde{m}_i\}, \quad (4)$$

где n_w – количество окон преобразования Фурье, W_j – оператор окон Фурье, который разделяет куб исходных данных на окна с областями перекрытия размером в половину заданных окон, M_j – оператор смешивания окон, который снова соединяет их в один куб, $T_{\tau_i(\omega)}$ – оператор порогового значения, в котором $\tau_i(\omega)$ определяет порог для каждой частоты на i -той итерации, α – длина шага, которая равна обратному значению максимальной кратности смешивания, а именно, максимальному количеству источников которые смешиваются в одной сейсмограмме.

Алгоритм последовательно реконструирует данные таким образом, чтобы получить их в том виде, как если бы они были получены классическим методом съёмки. При этом, реконструкция начинается с событий, имеющих наибольшую амплитуду и плавно спускается к все меньшим и меньшим амплитудам, завершаясь по достижению либо числа

Алгоритм разделения данных от перекрывающихся источников	
1:	Входные данные: $d, \Gamma, W, M, n_w, \alpha, \tau_{max}, \tau_{min}(\omega), n_{итер}$
2:	Инициализация: $i = 0, \tilde{m}_0 = 0, R^{-1} = d, \tau_0(\omega) = \tau_{max}, tol = \min \tau_{min}(\omega)$
3:	пока $\min \tau_{min}(\omega) \geq tol \ \& \ i \leq n_{итер}$ выполнять следующее
4:	$R^i = d - \Gamma \tilde{m}_i$;
5:	если $\ R^i\ _2 > \ R^{i-1}\ _2$ тогда
6:	остановить
7:	$\tilde{m}_{i+1} = \sum_{j=1}^{n_w} M_j S_j^{-1} T_{\tau_i(\omega)} S_j W_j \{ \tilde{m}_i + \alpha \Gamma^H R^i \}$
8:	$\tau^{i+1}(\omega) = \tau_{max} \times 0.9^{i+1}$
9:	если $\tau^{i+1}(\omega) \leq \tau_{min}(\omega)$ тогда
10:	$\tau^{i+1}(\omega) = \tau_{min}(\omega)$;
11:	$i = i + 1$;
12:	завершить пока
13:	Возврат $\tilde{m}_i$

▲ Табл. 1. Алгоритм разделения данных от перекрывающихся источников.

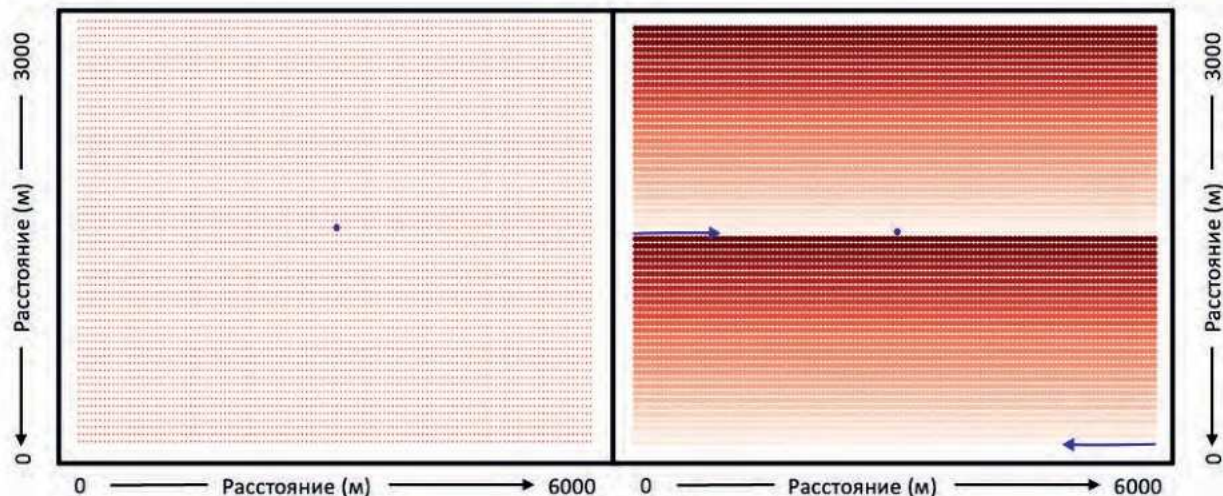
итераций, либо заданного порогового значения. Схематично работа алгоритма представлена в таблице 1.

Разделение синтетически смешанных данных

Для тестирования вышеописанного алгоритма был использован набор дан-

ных, состоящий из одного пункта приема (одна сейсмограмма ОПП) для 60 линий возбуждения источников, при этом каждая линия состоит из 120 точек возбуждения сигнала. Излучение сигнала производилось по регулярной сети 50x50 метров, общее количество ПВ в данном наборе составило 7200 (Рис. 4).

▼ Рис. 4. Слева: геометрия съёмки. Синяя точка обозначает координату пункта приема. Красными обозначены координаты пунктов взрыва. Справа: геометрия перекрывающегося отстрела площади. Синими стрелками обозначено направление движения судов-источников. Цветом обозначены абсолютные времена выстрелов с момента начала съемки. Чем «краснее» тем больше время выстрела.



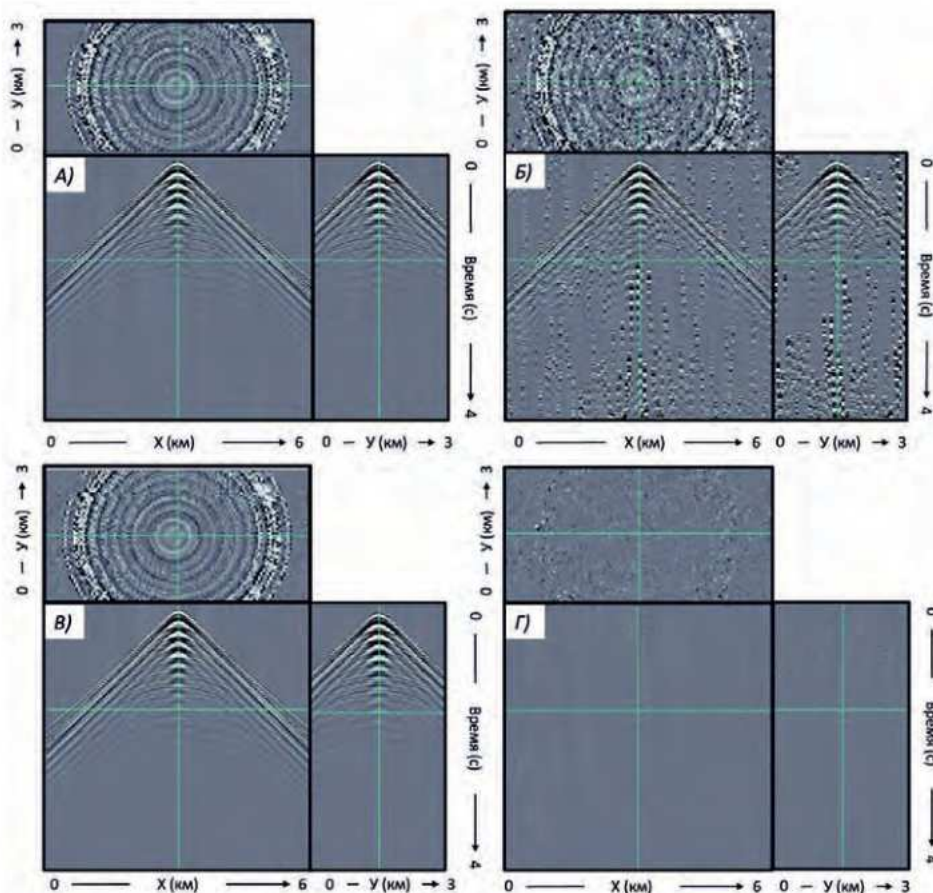


Рис. 5.
 А) Исходная сейсмограмма ОПП.
 Б) Сейсмограмма ОПП после смешивания согласно описанной выше геометрии отстрела.
 В) Результаты после применения алгоритма.
 Г) Разница между исходными данными и данными после применения алгоритма (А-В).

В целях оптимизации времени вычислений длина записи была сокращена с первоначальных 8 секунд до 4 секунд. Далее был смоделирован оператор смешивания данных Γ таким образом, чтобы представить ситуацию, когда два судна выполняют одновременный проход по линиям возбуждения с интервалом между выстрелами 3 секунды со случайным колебанием между выстрелами равным ± 0.6 секунд взятым из распределения Гаусса. Введение колебания времен выстрелов относительно друг друга необходимо для того, чтобы шум от вторичного источника на сейсмограмме выглядел случайным [2]. Максимальная кратность выстрелов (количество смешанных возбуждений внутри одной сейсмограммы) достигает 4, что соответствует самым современным съемкам, проведенным с перекрывающимися источниками. На рисунке 5 (а) представлена исходная сейсмограм-

ма, на рисунке 5 (б) сейсмограмма после смешивания сигнала от нескольких источников согласно вышеописанным параметрам, на которых выделяется сильный шум от смешивания выстрелов. Результаты применения алгоритма разделения сигнала от перекрывающихся источников и ошибка применения алгоритма приведены на рисунке 5 (в) и 5 (д) соответственно.

Анализ результатов показывает, что алгоритму удалось почти полностью подавить сильный шум, возникающий от перекрывающихся источников. Итоговое соотношение сигнал/шум по результатам применения метода составило 17 дБ. Динамика соотношения сигнал/шум в зависимости от количества итераций алгоритма показана на рисунке 6, из которого видно, что начиная с примерно 100-й итерации соотношение сигнал/шум выходит на плато.

Несмотря на успешное подавление



▲ Рис. 6. График соотношения сигнал/шум в зависимости от количества итераций алгоритма.

интерференции от перекрывающихся источников, можно наблюдать небольшие потери полезного сигнала (рис. 5 (г)), особенно в районе от 3 до 4 секунд, где полезный сигнал скрыт под очень сильным шумом. Данная ошибка связана с тем, что алгоритм минимизирует квадрат евклидовой нормы в процессе итераций, но не делает эту разницу равным нулю. Таким образом для получения финального результата для разделения сигнала может потребоваться несколько операций пост-обработки.

Заключение

Методика проведения сейсмической съемки с перекрывающимися источниками открывает большие возможности для уменьшения времени полевых работ и сокращения затрат на их проведение, что в условиях достаточно коротких полевых сезонов на шельфе Российской Федерации является крайне актуальной задачей. В данной работе авторами представлен алгоритм разделения сигналов от перекрывающихся источников на основе разреженной инверсии. Результат применения алгоритма на синтетических данных показывает, что существует возможность подавить шум от вторичных источников с высоким качеством и с минимальными потерями для полезного сигнала.

Литература

1. Ошкин А. Н. и др. Методы минимизации и подавления корреляционных шумов одновременно работающих источников в вибросейсморазведке // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2019. – №. 1. – С. 98-106.
2. Abma R., Foster M. S. Simultaneous source seismic acquisition. – Society of Exploration Geophysicists, 2020, 205 с.
3. Blumensath T., Davies M. E. Iterative hard thresholding for compressed sensing // Applied and computational harmonic analysis. – 2009. – Т. 27. – №. 3. – С. 265-274.
4. Chen Y. Deblending using a space-varying median filter // Exploration Geophysics. – 2015. – Т. 46. – №. 4. – С. 332-341.
5. Chen Y., Sun Y. Deblending using normal moveout and median filtering in common midpoint gathers // Journal of Geophysics and Engineering. – 2014. – Т. 11. – №. 4. – С. 045012
6. Chen Y. Zhang D., Jin Z. et al. Simultaneous denoising and reconstruction of 5-D seismic data via damped rank-reduction method // Geophysical Journal International. – 2016. – Т. 206. – №. 3. – С. 1695-1717.
7. Gan S., Wang S., Chen Y. et al. Separation of simultaneous sources using a structural-oriented median filter in the flattened dimension // Computers & Geosciences. – 2016. – Т. 86. – С. 46-54.
8. Ibanez W., Hostetler J., Kumar R. et al. Deblending the High Point Broadband Towed-Streamer 3D Seismic Data Using the Multistage Iterative Separation of Simultaneous Sources // First EAGE Guyana-Suriname Basin Conference. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. – Т. 2022. – №. 1. – С. 1-5
9. Jeong, W., Tsingas, C. and Almubarak, M.S., 2022. Deblending and merging of 3D multi-sweep seismic blended data. Geophysical Prospecting, 70(2), pp.246-261.
10. Mahdad A. Deblending of seismic data. // Doctoral thesis, TU Delft, Delft University of Technology – 2012.
11. Mahmoudian F. Curtis J., Meersman K. et al. Deblending of simultaneous source data. // Geoconvention conference and exhibition, extended abstracts – 2023 – С. 1 – 8
12. Ravasi M., Seismic deblending with a hard data constraint, IMAGE exhibition abstracts, 2024 – С. 1 – 4