

УДК 550.834

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-4-103-106

ТЕХНОЛОГИИ РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ПЕРЕКРЫВАЮЩЕМСЯ ОТСТРЕЛЕ ПЛОЩАДИ МОРСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геннадий Алексеевич Казанин^{1✉}, Валерий Гарифьянович Гайнанов²

¹ АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция»; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; g.kazanin@mage.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; gainan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8851-8781>

Аннотация. В статье рассмотрены преимущества выполнения морской сейсмической съемки с использованием нескольких источников, сигнал от которых регистрируется на одной сейсмической записи, и описаны основные методы подавления возникающей при этом интерференции. По итогам анализа современных методов подавления такой интерференции сделан вывод о том, что использование разреженной инверсии позволяет наилучшим образом справиться с этой задачей.

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

Для цитирования: Казанин Г.А., Гайнанов В.Г. Технологии разделения сигналов при перекрывающемся отстреле площади морских сейсмических исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 4. С. 103–106.

DEBLENDING OF MARINE SEISMIC DATA TECHNOLOGIES ACQUIRED BY SIMULTANEOUS SHOOTING

Gennady A. Kazanin^{1✉}, Valeriy G. Gainanov²

¹ Marine Arctic Geological Expedition JSC; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; g.kazanin@mage.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; gainan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8851-8781>

Abstract. Offshore seismic data acquisition using simultaneous shooting has significant advantages over a classic single source seismic survey. However, it is necessary to eliminate the interference of multiple sources — to perform deblending. The paper discusses current state of deblending techniques and suggests that application of sparse inversion is the best option to suppress the blending noise.

Keywords: seismic, simultaneous source, sparse inversion, offshore, deblending, multisource, signal separation

For citation: Kazanin G.A., Gainanov V.G. Deblending of marine seismic data technologies acquired by simultaneous shooting. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 4: 103–106. (In Russ.).

Введение. Классическая методика выполнения сейсморазведочных работ на шельфе подразумевает под собой возбуждение сигнала последовательно с задержкой, таким образом, чтобы сигнал от последующих взрывов не интерферировал с предыдущим, что накладывает два существенных ограничения: первое — по минимальному расстоянию между пунктами взрыва (ПВ), так как судно не может идти медленней определенной скорости, при которой забортное оборудование будет сохранять плавучесть; второе — по максимальной скорости движения судна, так как время на прохождения расстояния между двумя ПВ должно быть больше, чем длительность записи, другими словами, судно вынуждено идти медленнее чем может, что приводит к увеличению продолжительности полевых работ и, следовательно, стоимости. Для снятия вышеописанных ограничений существует методика выполнения сейсмических работ с перекрывающимися источниками [Beasley, et al., 1998; Berkhouit, 2008], при которой допускается возникновение интерференции от нескольких источников на сейсмической записи.

Преимущества выполнения сейсмической съемки с перекрывающимися источниками. Методика выполнения работ с перекрывающимися источниками подразумевает под собой использование одного судна-источника с тремя буксируемыми линиями источников (так называемый flip-flop-flap), которые возбуждаются с меньшим интервалом времени, либо двух и более судов-источников с двумя или тремя линиями источников, которые одновременно выполняют отстрел по профилям в разных частях исследуемой площади. Основными преимуществами такой методики являются возможность увеличения плотности пунктов возбуждения, получение сигнала с различных азимутов, уменьшение длительности выполнения полевых работ ввиду меньшего времени между выстрелами и/или одновременным выполнением нескольких профилей [Reinicke, 2015]. Более того, данная методика предоставляет возможность гибкого проектирования сейсмической съемки, при котором можно делать выбор, как в пользу уменьшения длительности и стоимости съемки, так и в пользу увеличения коли-

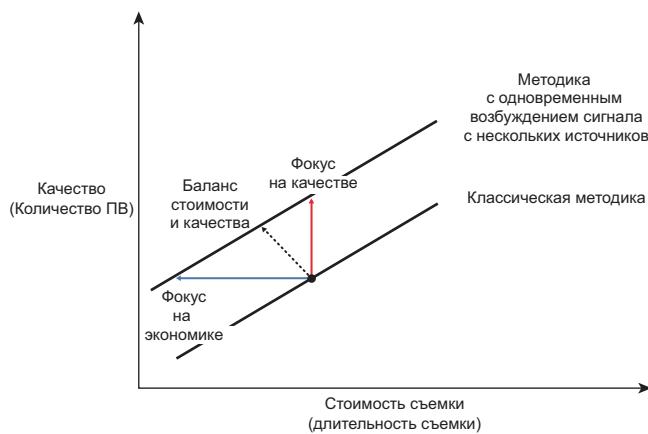


Рис. 1. Схематическое сравнение стоимости и качества работ выполняемых по классической методике сейсморазведочных работ и по методике с перекрывающимся возбуждением сигнала [Mahdad, 2012]

чества ПВ и качества съемки (рис. 1). Таким образом, технология проведения работ с перекрывающимися источниками имеет множество преимуществ, но ее использование ведет к возникновению интерференции на сейсмических записях (рис. 2).

Методы разделения сигналов от нескольких источников. Методы подавления интерференции от вторичных источников основаны на том, что сигнал от второго и дальнейших источников является некогерентным (случайным) на сейсмограммах общего пункта приема (рис. 2), это дает возможность применять различные методики шумоподавления. На сегодняшний день существуют две основные группы

методов для подавления интерференции. Первая группа методов рассматривает интерференцию от другого источника как шум и для его подавления использует такие методики как фильтрация с помощью различных вариаций медианного фильтра [Chen, et al., 2014, 2020; Chen, 2015; Gan, et al., 2016; Ошкун и др., 2019] и поверхностно согласованную фильтрацию [Chen, et al., 2016]. Методы подавления шума, основанные на фильтрации достаточно простые и эффективные, но не всегда приводят к желаемому результату и часто ослабляют основной сигнал от отражений. Кроме того, параметризация процесса фильтрации ведет к высоким временным и вычислительным затратам на тестирование в процессе обработки данных.

Вторая группа методов рассматривает интерференцию как сигнал от другого источника и использует инверсию для разделения данных. Данные методы используют матричное представление сейсмических данных и формулируют проблему деблэндинга как обратную задачу, которая восстанавливает неизвестные данные без шума от вторичных источников с помощью инверсии. В общем виде данная задача формулируется следующим образом:

$$d = \Gamma m,$$

где d — полученные данные с перекрывающимися источниками, Γ — матрица источников, которая отражает то, как смешаны источники, m — данные без шума от других источников, для которых требуется решить уравнение.

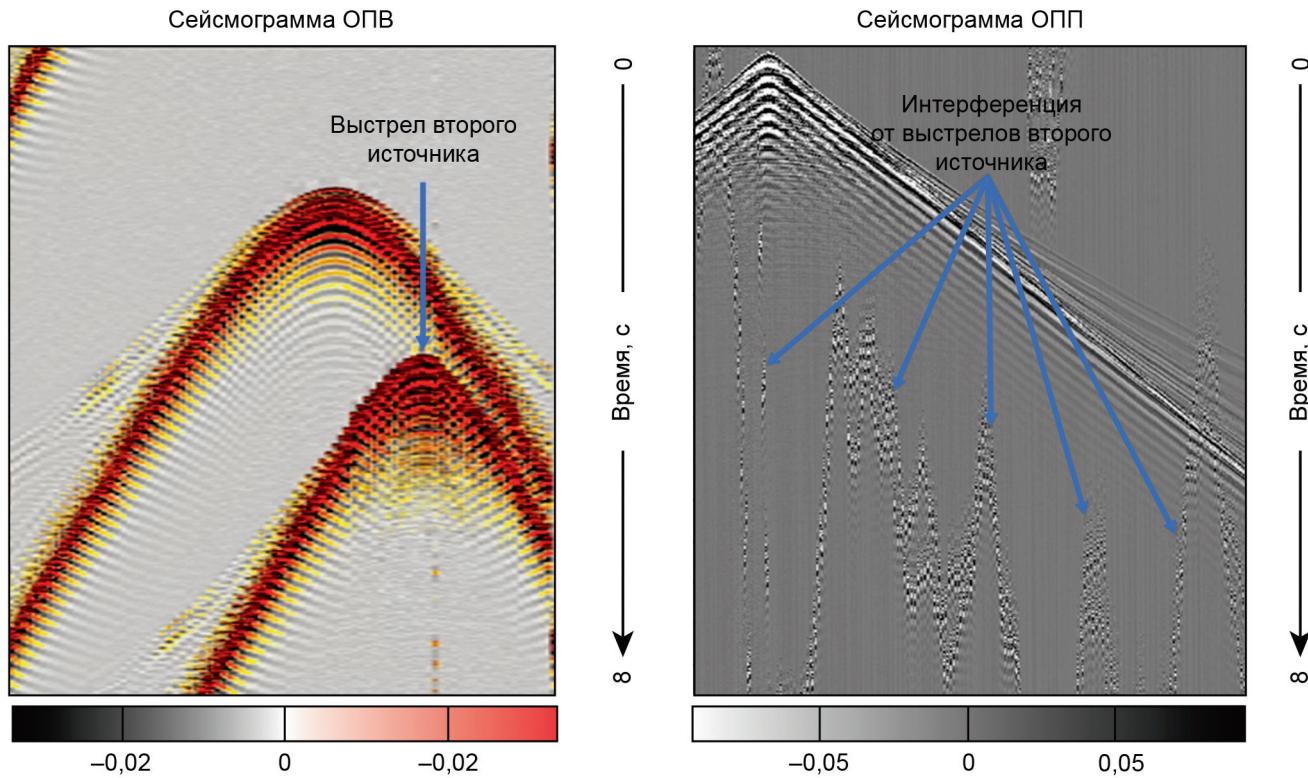


Рис. 2. Пример сейсмограммы общего пункта взрыва (слева) и общего пункта приема (справа) полученных по результатам сейсмической съемки с перекрывающимися источниками. Источник — архив АО «МАГЭ»

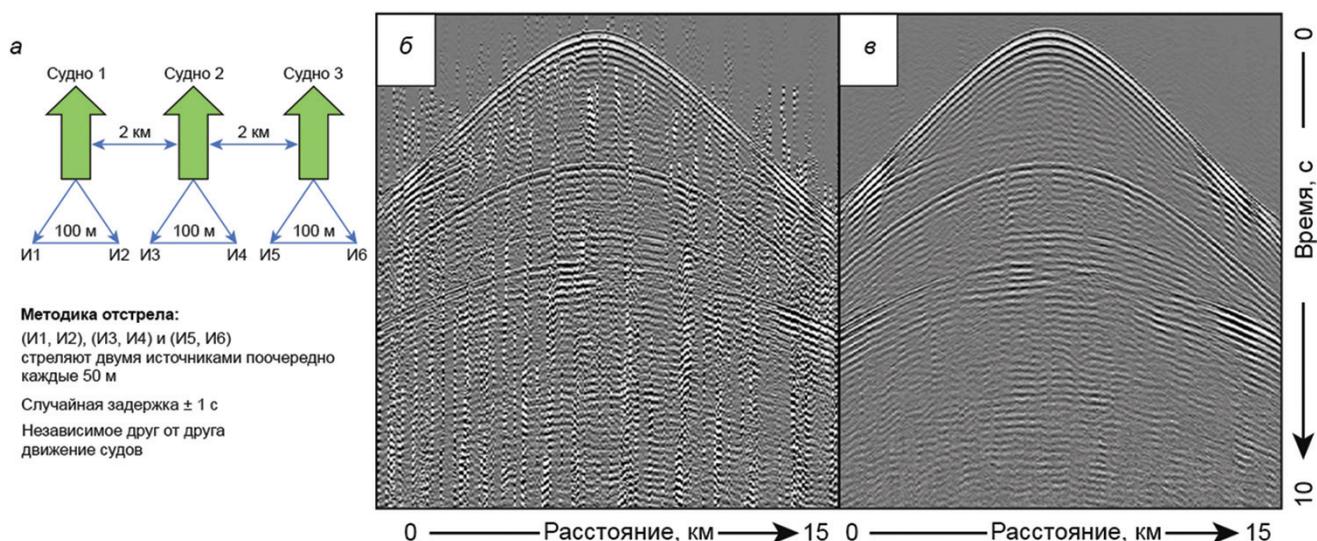


Рис. 3. Результат применения метода разряженной инверсии для разделения сигналов от нескольких источников [Kumar, et al., 2021]: *а* — методика отстрела площади; *б* — исходная сейсмограмма ОПП, полученная по результатам полевых работ; *в* — результат подавления сигналов от вторичных источников с помощью применения разряженной инверсии

Строк в матрице d меньше, чем в матрице t так как общее количество единичных физических экспериментов (излучений сейсмического сигнала) при выполнении работ с перекрывающимися источниками меньше, чем при классической методике. Таким образом, задача решения уравнения является некорректной и требует регуляризации.

Стандартным подходом для решения такого уравнения является инверсия наименьших квадратов [Mahdad, 2012; Mahmodian, et al., 2023]. Однако данный вид инверсии редко используется при разделении сигналов от перекрывающихся источников, так как не всегда удается полностью подавить шум [Abma, Foster, 2020]. На сегодняшний день наилучшим образом задачу по разделению сигнала решают различные методики разряженной (редкой) инверсии с применением разряженных преобразований таких как: F-К преобразование, преобразование Радона, сейслет и курвлефт преобразования [Abma, Foster, 2020].

Пример использования разряженной инверсии для разделения сигнала от перекрывающихся источников показан на рис. 3 [Kumar, et al., 2021]. Данные сейсмические работы 3D выполнялись с применением донного оборудования. При этом суда шли по профилям независимо друг от друга (как встречным, так и параллельным курсом). Использовалось три

судна, каждое из которых буксировало по два источника (рис. 3, *а*). Сейсмограмма ОПП, полученная по итогам полевых работ показана на рис. 3, *б*, на котором шум от вторичных источников выражен как случайный шум, распределенный по всей сейсмограмме. После чего была применена разряженная инверсия (рис. 3, *в*), которая позволила полностью избавиться от шума без каких-либо существенных потерь основного сигнала.

Выводы. Методика выполнения сейсмических работ с перекрывающимися источниками, несомненно, имеет множество преимуществ и позволяет выполнять морские полевые сейсморазведочные работы за меньший период времени, и, следовательно с меньшими затратами, что в условиях коротких (120–150 дней) полевых сезонов на шельфе Российской Федерации является критически важной задачей. Основной сложностью при выполнении работ с перекрывающимися источниками является необходимость разделять данные от разных источников сигнала. Авторами были проанализированы актуальные на момент написания статьи методы подавления шума от вторичных источников сигнала и сделан вывод о том, что применение разряженной инверсии для этих целей позволяет наилучшим образом выполнить данную задачу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ошкун А.Н., Коньков А.И., Тарасов А.В. и др. Методы минимизации и подавления корреляционных шумов одновременно работающих источников в вибросейсморазведке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 1. С. 98–106.

Abma R., Foster M.S. Simultaneous source seismic acquisition. Society of Exploration Geophysicists, 2020. 205 с.

Beasley C.J., Chambers R.E., Jiang Z. A new look at simultaneous sources. Seg technical program expanded abstracts 1998 // Society of Exploration Geophysicists. 1998. С. 133–135.

Berkhout A.J. Changing the mindset in seismic data acquisition // The Leading Edge. 2008. Т. 27, № 7. С. 924–938.

Chen Y. Deblending using a space-varying median filter // Exploration Geophysics. 2015. Т. 46, № 4. С. 332–341.

Chen Y, Sun Y. Deblending using normal moveout and median filtering in common midpoint gathers // Journal of Geophysics and Engineering. 2014. T. 11, № 4. C. 045012.

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. T. 206, № 3. C. 1695–1717.

Chen Y, Zu S, Wang Y, et al. Deblending of simultaneous source data using a structure-oriented space-varying median filter // Geophysical Journal International. 2020. T. 222, № 3. C. 1805–1823.

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. T. 86. C. 46–54.

Kumar R, Kamil Amin Y.I, Mahdad A, et al. Inherent Challenges of Randomized Shooting Strategies on Deblending and a Robust Multistage Prior Based Solution // 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. T. 2021, № 1. C. 1–5.

Mahdad A. Deblending of seismic data: PhD thesis, Delft University of Technology, 2012. <https://resolver.tudelft.nl/uuid:68883d84-3cf3-4b5c-a8ee-9c0a92604fce>

Mahmoudian F, Curtis J, Meersman K, et al. Deblending of simultaneous source data. // Geoconvention conference and exhibition, extended abstracts. 2023. C. 1–8.

Urruticoechea C.R Seismic blending and deblending of crossline sources // Master's thesis, Delft University of Technology, 2015. <https://resolver.tudelft.nl/uuid:d73234ae-d7e0-4348-ac69-92078820438c>

Статья поступила в редакцию 28.11.2024,
одобрена после рецензирования 12.03.2025,
принята к публикации 28.08.2025