

Влияние случайной задержки между возбуждением сигналов при перекрывающемся отстреле на характер наблюдаемого шума

■ Казанин Г.А.^{1,2}, Гайнанов В.Г.², Базилевич С.О.¹

¹АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», Мурманск

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

Аннотация. При выполнении сейсморазведочных работ с перекрывающимся отстрелом несколькими источниками изменение задержки от выстрела к выстрелу играет значительную роль. В данной работе представлены теоретические и практические аспекты влияния задержки на характер шума от перекрывающихся источников. Показаны результаты моделирования шума от перекрывающихся источников для разных значений случайной задержки. Проанализирован полевой материал опытно-методических работ, проведенных с перекрывающимися источниками и сделан вывод о том, что при полевых работах необходимо вводить аппаратную случайную задержку к временам выстрелов со значениями не менее ± 0.25 с.

Введение

На сегодняшний день данные сейсморазведочных работ остаются основным методом получения достоверной геолого-геофизической модели месторождений углеводородов. Помимо сейсморазведочных работ с буксируемыми косами, широкое применение получили методы сейсморазведки с донным оборудованием с использованием кабелей или донных автономных станций. По мере роста доли работ с донным оборудованием, совершенствуются и методики отработки, позволяющие получить увеличение производительности и уменьшающие потребляемые временные и денежные ресурсы. Одной из таких методик является отработка площади сейсморазведочных работ двумя и более источниками одновременно, буксируемыми одним или несколькими судами (с перекрывающимся возбуждением). В этом случае остро встает вопрос разделения волновых полей от каждого источника, в том числе и в зонах интенсивной интерференции сигнала.

В последние годы методика выполнения полевых сейсмических работ 3D с

перекрывающимся возбуждением сигналов несколькими источниками стала все шире использоваться в морской сейсморазведке [4]. Однако при использовании перекрывающихся источников возникает интерференция от перекрывающихся взрывов на сейсмических записях, что приводит к необходимости разделения сигналов от разных источников на первичном этапе обработки данных. Стандартным методом [3] выполнения данной процедуры является применение разреженной инверсии. Данный метод разделения волновых полей от разных источников во многом основывается на том, что в сортировке сейсмограмм по общему пункту приема сигнал от вторичных источников представляется как случайный, некогерентный шум. Надежность и качество выполнения данной процедуры зависит от следующих факторов [7]:

- а. количество источников, возбуждаемых в любой момент времени
- б. временная задержка между разными источниками
- в. степень случайности задержки между последовательными выстрелами
- г. диаграмма направленности вол-

нового поля, регистрируемая приемником от всех источников, возбуждаемых одновременно

Данные факторы диктуют степень и характер шума возникающей интерференции. Наибольшее влияние оказывает случайность задержки между выстрелами [2].

В данной статье рассматриваются причины введения случайной задержки между последовательными выстрелами одного судна при выполнении работ с перекрывающимися источниками и оценивается влияние этой задержки на характер шума, возникающего при интерференции источников.

Теория

Согласно прямой сейсмической модели [5] матрица сейсмических данных P может быть представлена как умножение матрицы источников S , матрицы импульса земли X , и матрицы приемников D , при этом каждая из этих матриц относится к одному частотному компоненту:

$$P = DXS \quad (1)$$

Процесс прямого смешивания сейсмических данных от разных источников может быть описан путем введения

матрицы смешанных источников $S_{см.}$:

$$S_{см.} = S\Gamma \quad (2)$$

где, Γ является матрицей смешивания, показывающей как именно смешаны сигналы от перекрывающихся источников. Следовательно, данные $P_{см.}$ с сигналом от нескольких перекрывающихся источников можно представить следующим образом:

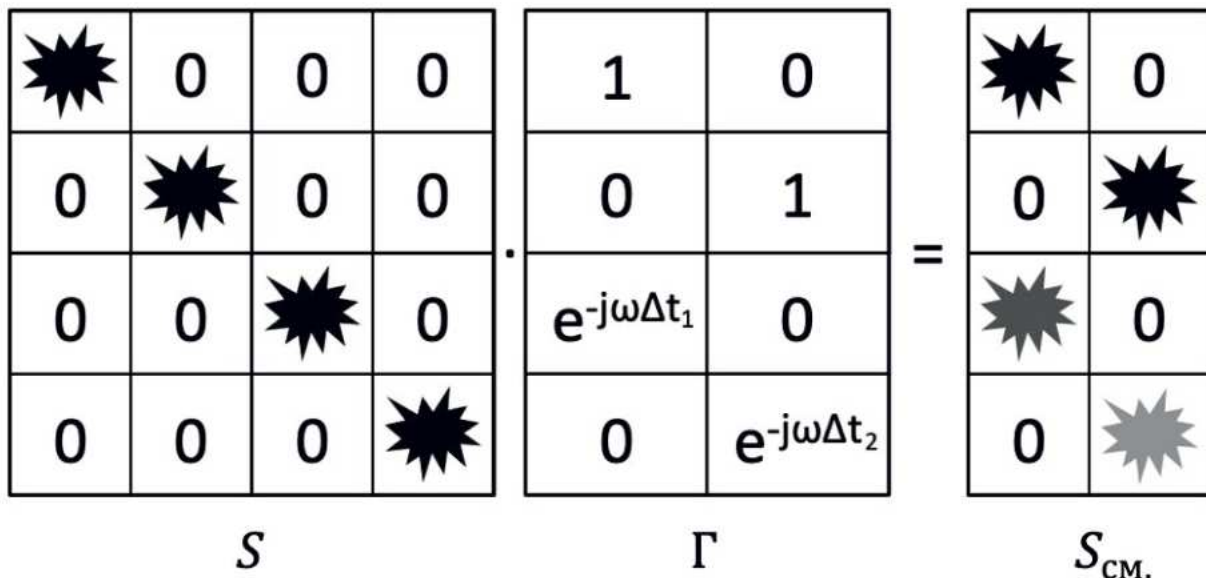
$$P_{см.} = DXS_{см.} = DXS\Gamma = P\Gamma \quad (3)$$

Так как при проведении работ со смешанными источниками матрица приемника D никак не затрагивается, а методика съёмки никак не влияет на импульс земли X , можно переформулировать выражение (3):

$$P_{см.} = P\Gamma \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой прямую задачу смешивания сейсмических данных. Рассмотрим матрицу смешанных источников $S_{см.}$ (2) подробнее на рисунке 1.

Каждый ряд Γ представляет собой позицию выстрела, а колонка каждое возбуждение сигнала с несколькими источниками. Таким образом процесс формирования матрицы $S_{см.}$ выглядит следующим образом: элемент γ_{ij} матрицы смешивания Γ включает в себя источник i и эксперимент j . Если источник i не



▲ Рис. 1. Матрица смешанных источников $S_{см}$ [9].

возбуждался, то j -тый эксперимент γ_{ij} равен нулю. Если возбуждался, то источник i имеет амплитуду A_{ij} и относительную временную задержку Δt_{ij} относительно первого источника, задействованного в j -том опыте с несколькими источниками.

$$\gamma_{ij} = A_{ij}e^{-jw\Delta t_{ij}} \quad (5)$$

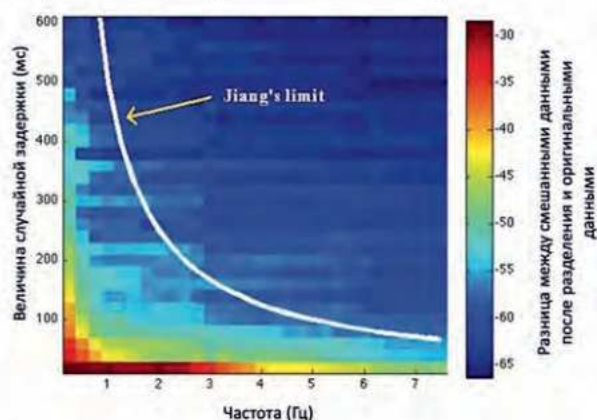
Следовательно элементы матрицы Γ включают в себя фазовую составляющую $e^{-jw\Delta t_{ij}}$. При использовании постоянной задержки во времени между излучением сигнала к матрице данных $\mathbf{P}$ будет постоянно применяться один и тот же фазовый сдвиг. Если же задержка между выстрелами случайна, элементы матрицы Γ имеют разную фазу, что приводит искажению фаз колонок матрицы данных $\mathbf{P}$. На реальные данные этот фазовый сдвиг будет оказывать следующее влияние: чем больше фазовый сдвиг и выше степень случайности задержки между последовательными выстрелами, тем более некогерентным шум будет выглядеть на сейсмограммах ОПП и тем легче его будет разделить.

Исходя из вышеописанного можно сделать вывод о том, что случайная за-

держка между излучением сигнала источника является критически важным параметром при проведении полевых работ. Следовательно, встает вопрос о том, какая величина этой задержки необходима для успешного разделения сигналов от перекрывающихся источников. В своей работе [2] показал результаты моделирования смешанных данных с различной задержкой (Рис. 2), которые после разделены с применением алгоритма разреженной инверсии. Из этих результатов можно сделать вывод о том, что минимальная необходимая задержка для качественного разделения должна составлять минимум ± 0.250 с. В другой работе [1] авторам удалось успешно провести разделение данных от перекрывающихся источников с задержкой ± 0.150 с, что не умоляет прошлый вывод, так как большая задержка приводит к лучшему разделению шума.

Источники случайной задержки при полевых работах

В теоретической части работы был сделан вывод о том, что минимально необходимая задержка должна составлять минимум ± 0.250 с. Рассмотрим основные причины возникновения случайных задержек, которые можно поделить на две группы: естественные и аппаратные. Естественные причины связаны с погодными условиями, подводными течениями, ветром, следствием которых является незначительная вариация скорости судна на профиле, что и ведет к возникновению смещения времен между выстрелами. Однако погодные условия не всегда могут обеспечить требуемую задержку, более того они могут быть вполне регулярны [3]. Следовательно, требуется вводить аппаратную задержку на основе таблицы случайных чисел (Рис 3.) в целях обес-



▲ Рис 2. Результаты опыта по разделению синтетически смешанных данных с различной задержкой. Цветом обозначена разница разделенных данных и оригинальных, чем темнее оттенок синего цвета, тем лучше разница [2].

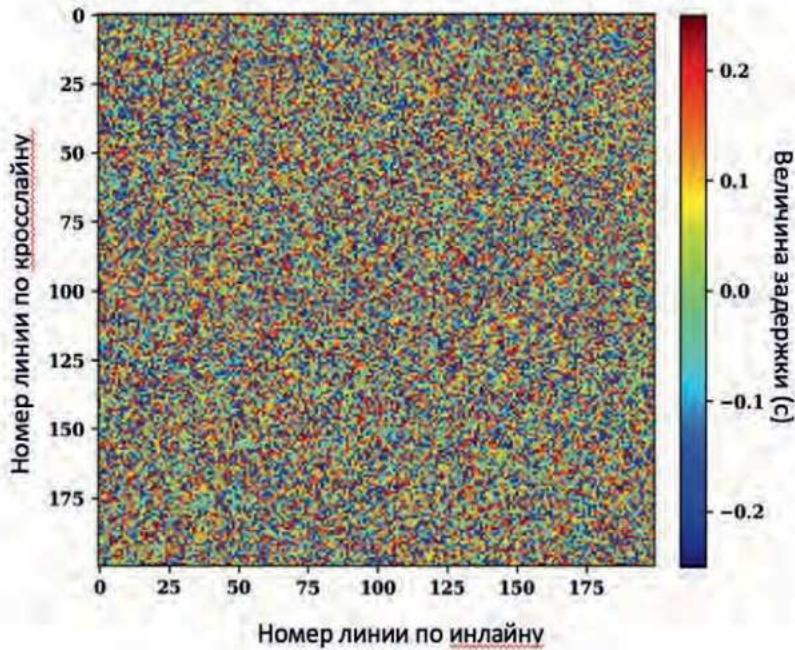


Рис 3. Таблица аппаратной задержки выстрелов для выполнения полевых работ с перекрывающимися источниками [2].

печения достаточной случайности времен возбуждений. Таким образом, для выполнения полевых работ с перекрывающимися источниками наилучшим образом подходит введение случайной задержки на основе комбинированных факторов: естественных и аппаратных [3].

Влияние случайной задержки на характер шума синтетически смешанных данных

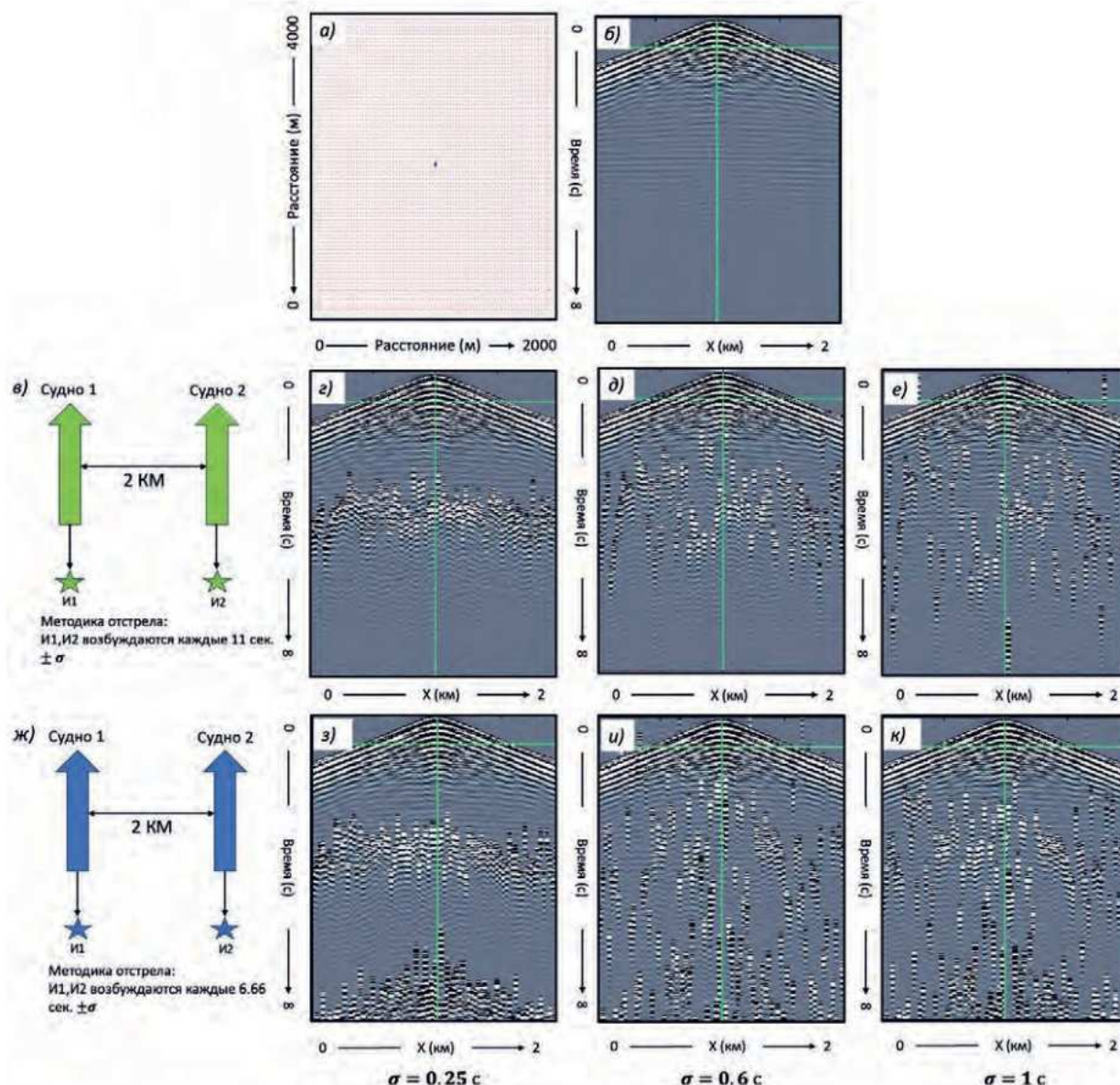
В целях демонстрации зависимости влияния случайной задержки на характер и степень шума, возникающего при интерференции нескольких источников, авторами проведено синтетическое моделирование шума на одной 3D сейсмограмме общего пункта приема. Массив данных состоит из 80 линий возбуждения сигнала с расстоянием между ПВ 25 метров по профилю (ось x) и 50 метров между профилями (ось y), длина записи составляет 8 секунд (рис 4, а). Сейсмограмма ОПВ без шума представлена на рисунке 4, б. Данные были смоделированы для двух конфигураций источника и для трех различных задержек между выстрелами.

Случай 1 (рис.4 в, г, д, е):

Два судна идут параллельным курсом, каждое буксирует один источник, интервал между выстрелами составляет 11 с. Второе судно начинает проход по профилям на три секунды позже первого. Расстояние между судами составляет 2 км (Рис. 4, в). Данный случай имитация методики выполнения работ с перекрывающимися источниками с двумя судами-источниками в режиме флипп-флоп, то есть всего в работе 4 источника. В каждом варианте моделирования была добавлена случайная задержка путем добавления к временам выстрелов нормального распределения Гаусса с центром в нуле со среднеквадратичным отклонением 0.25 (Рис. 4, г), 0.6 (Рис. 4, д), 1 (Рис. 4, е) секунд соответственно. Из анализа результатов моделирования можно сделать вывод о том, что величина задержки действительно напрямую влияет на распределение и характер случайности возникающего шума.

Случай 2 (рис.4 ж, з, и, к):

Данный случай полностью аналогичен случаю 1 (Рис. 4, ж), за исключени-

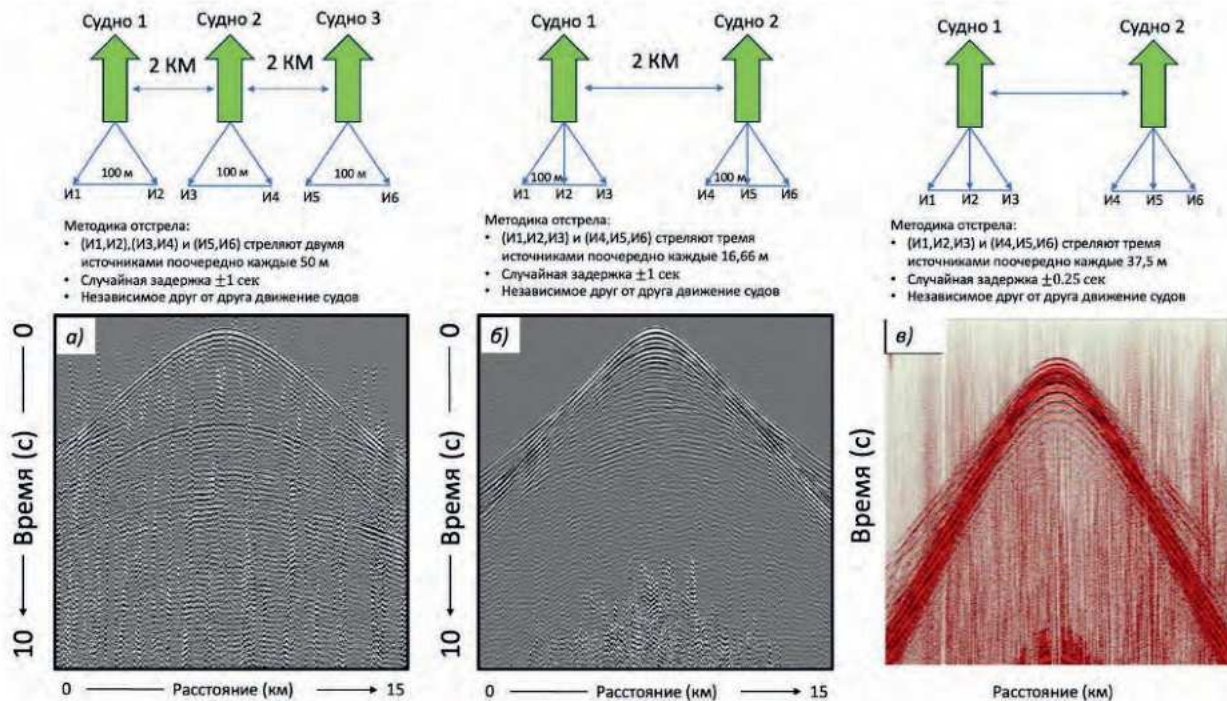


▲ Рис. 4. Результаты моделирования съемки с перекрывающимися источниками для двух конфигураций источников и трех различных случайных задержек времен между выстрелами. а) геометрия съемки; б) исходная сейсмограмма ОПП; в) конфигурация судов-источников, имитирующая методику работ с двумя судами-источниками с 4-мя источниками в режиме флип-флоп; г, д, е - результат моделирования данных для конфигурации судов (в) с различной задержкой: 0.25 с., 0.6 с., 1 с. соответственно; ж) конфигурация судов-источников, имитирующая работу двух-судов источников в с тремя источниками каждое – так называемый флип-флоп-флап; з, и, к - результат моделирования данных для конфигурации судов (ж) с различной задержкой: 0.25 с., 0.6 с., 1 с. соответственно.

ем того, что возбуждение сигнала судами происходит каждые 6.66 секунды, имитируя методику съемки с двумя судами-источниками, которые буксируют по 3 источника каждый. Аналогично случаю 1 хорошо заметен эффект уве-

личения степени случайности шума при увеличении среднего значения случайной задержки.

Результаты моделирования подтверждают предположение о том, что степень случайности задержки действи-



▲ Рис. 5. Пример сейсмограмм ОПП, полученных по результатам полевых работ с перекрывающимися источниками на шельфе Норвегии. Случайная задержка составляла 1 с. а) три судна источника с двумя источниками каждое; б) два судна источника с тремя источниками каждое [7]; в) ОПП, полученная по результатам работ [6], где кроме шума от второго источника присутствует интерференция от двух других сейсмических полевых работ, проходящих рядом на двух других участках. Точное время записи, интервал ПВ и расстояние между судами не указано так как данная информация не представлена в исследуемой статье.

тельно влияет на характер шума от перекрывающихся источников. В целях подтверждения данного вывода на рисунке 5 представлены результаты [7] полевых работ с перекрывающимися источниками в Северном море для двух различных конфигураций судов источников. Характер шума (Рис. 5, а) для трех судов-источников в режиме флипп-флоп сильно напоминает шум на рисунке 4-е. Однако, для второй конфигурации источника (Рис. 5, б) два судна с тремя источниками, заметна только интерференция от того же судна. Вероятно, данная запись была сделана без участия второго судна. На рисунке 5, в показана еще одна сейсмограмма ОПП из работы [6], где суда работают в аналогичной конфигурации (но со случайной задержкой 0.25 с.), кроме интерфе-

ренции внутри собственно района полевых работ, на записи имеется интерференция от выстрелов на двух соседних участках сейсмических работ, проводимых в тот момент времени в регионе. Несмотря на это результаты моделирования вполне сходятся с реальными полевыми данными, приводимыми в литературе.

Анализ характера шума в зависимости от размера случайной задержки на примере полевых данных

В 2022 году АО «МАГЭ» были проведены опытно-методические работы с перекрывающимися источниками в целях получения полевого материала и отработки алгоритма обработки данных с шумом от интерферирующих возбуждений. Было задействовано два сейс-



▲ Рис. 6. Конфигурация судов-источников, использованная на опытно-методических работах.

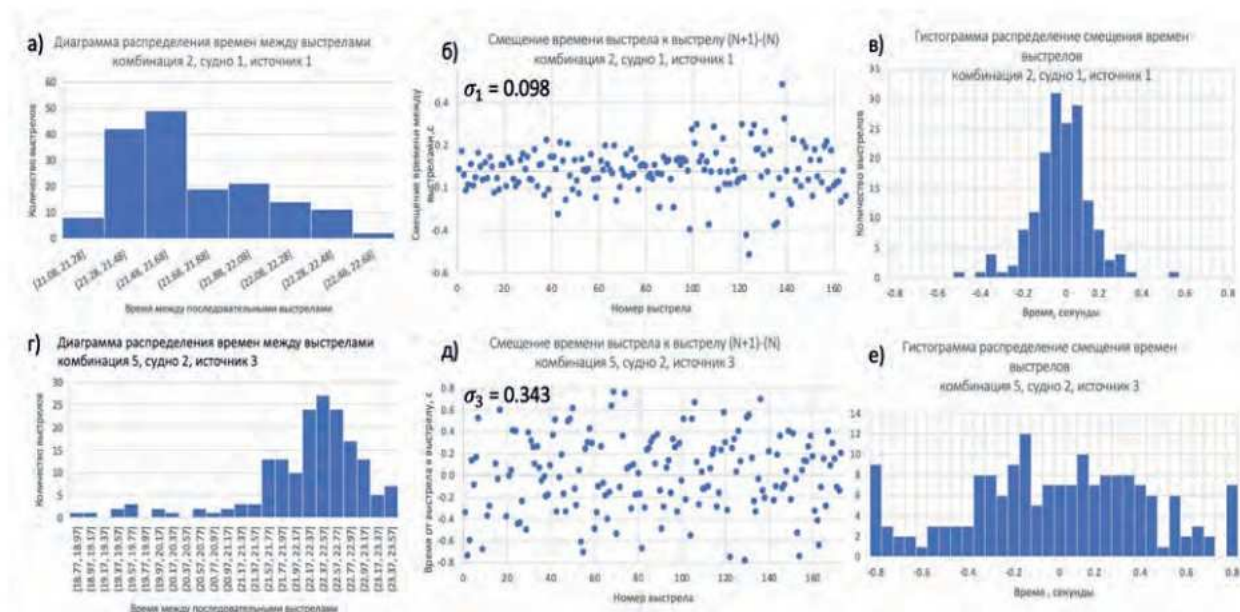
мических судна (Рис. 6), буксирующих за собой по два источника, которые возбуждались поочередно каждые 25 м, расстояние между источниками одного судна составляло 50 м. Всего было отработано всего 12 линий взрыва, каждое судно прошло по 6 линиям, расстояние между судами (линиями) составляло 4 км. В роли сейсмических приемников выступали донные станции. Важно обратить внимание на то,

▼ Табл. 1. Результаты расчетов среднеквадратического отклонения времен выстрелов для выполненных опытно-методических работ.

№ комбинации линий ПВ	Судно 1		Судно 2		Среднее σ по комбинации (среднее и1+и2+и3+и4)
	№ Источника	σ , сек	№ Источника	σ , сек	
1	И1	0.179	И3	0.221	0.218
	И2	0.190	И4	0.283	
2	И1	0.098	И3	0.203	0.155
	И2	0.106	И4	0.214	
3	И1	0.189	И3	0.284	0.244
	И2	0.178	И4	0.326	
4	И1	0.131	И3	0.195	0.160
	И2	0.125	И4	0.191	
5	И1	0.119	И3	0.343	0.222
	И2	0.105	И4	0.320	
6	И1	0.145	И3	0.188	0.149
	И2	0.156	И4	0.108	
	Среднее σ по судну 1	0.143	Среднее σ по судну 2	0.240	

что при выполнении данных работ не вводилась приборная задержка между последовательными выстрелами, то есть источником случайности времен являлись исключительно естественные причины.

В таблице 1 представлены результаты расчетов среднего отклонения времен выстрелов относительно друг друга. Рассчитывалось время между двумя последовательными выстрелами одного источника и после вычислялось временное смещение между промежутками выстрелов, по массиву смещений рассчитывалось среднеквадратичное отклонение σ . Как видно из расчетов, σ времен выстрелов судна 1 сильно отличается от судна 2, что вероятно, вызвано разницей в определении координат источников для судна 1 и судна 2. Дело в том, что координата источника судна 2 определялась только по одному акустическому приемнику RGPS в начале линии ПВ, когда у судна 1 было два RGPS в начале линии пневмоисточников и в конце. Тем самым точность определения позиции выстрела была выше, что приводило к меньшему смещению времен между выстрелами.



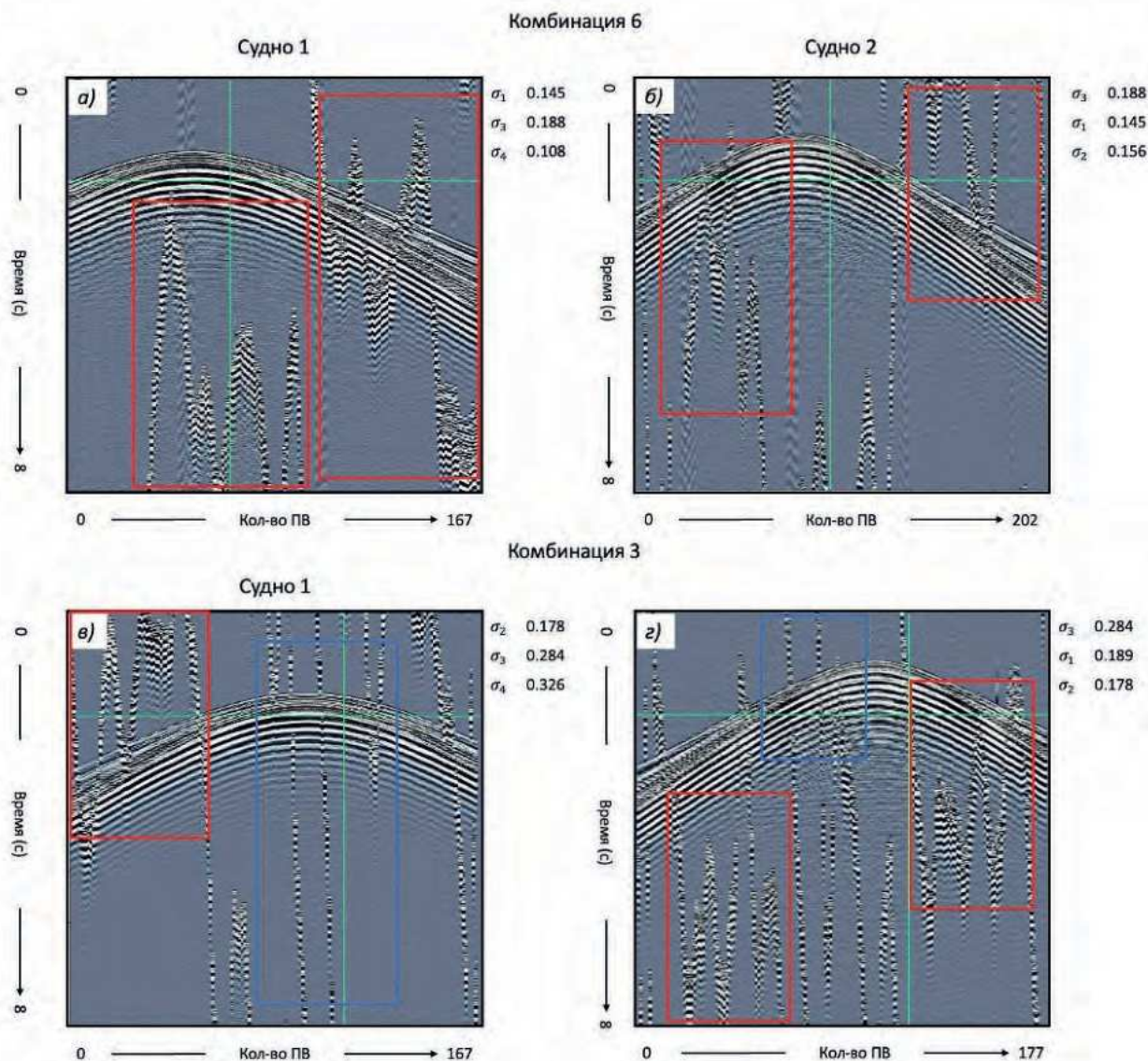
▲ Рис. 7. а, г - распределение времен между выстрелами для комбинации 1, судна 1, И1, и комбинации 5, судна 2, И3 соответственно; б, д - смещение времен от выстрела к выстрелу; в, е - гистограммы распределения смещения времен выстрелов.

Рассмотрим среднеквадратичное отклонение времен выстрелов более подробно на рисунке 7, где представлены гистограммы распределения времен выстрелов (Рис. 7, а, г), графики смещения времен выстрелов (Рис. 7, б, д) и гистограммы распределения смещения времен выстрелов (рис. 7, в, е) для источника 1 комбинации 2 (как для минимального отклонения) и для источника 3 комбинации 5. Смещение времен второго судна намного более хаотично, и менее предсказуемо, именно такие графики смещения (Рис. 7, д, е) требуется получать при выполнении полевых работ с перекрывающимися источниками.

В продолжении дискуссии рассмотрим сейсмограммы ОПП и характер смешанного шума для двух комбинаций с наименьшим (комбинация 6) и наибольшим (комбинация 3) значением среднеквадратичного отклонения на рисунке 8. На сейсмограммах (а) и (б) отчетливо виден сильный шум от второго источника, причем характер шума можно в какой-то мере считать когерентным и прослеживаемым, данный

шум выделен внутри красных окон. В свою очередь на сейсмограмме (в), где среднеквадратичное отклонение выше, уровень шума в разы меньше, как и случайность шума; более того внутри синего окна видны типичные для больших σ полосы шума (аналогично рис. 5, а). На сейсмограмме (г) снова появляются красные окна с когерентным шумом, что связано с меньшими значениями среднеквадратичного отклонения времен выстрелов первого судна. Считаем важным также отметить, что на характер шума влияет не только отклонение для второго судна, накладываемое на первое, но и случайность времен выстрела основного (первого) судна, что подтверждается синтетическими тестами.

На основании анализа смещения времен можно сделать вывод о том, что естественной вариации времени смещения достаточно для разделения данных с частотой более 4 Гц (согласно Рис. 2), что в будущем при обработке данных может существенно ухудшить результат процедуры разделения сигнала.



▲ Рис. 7. а, г - распределение времен между выстрелами для комбинации 1, судна 1, И1, и комбинации 5, судна 2, И3 соответственно; б, д - смещение времен от выстрела к выстрелу; в, е - гистограммы распределения смещения времен выстрелов.

лов от перекрывающихся источников. Таким образом, результаты как синтетических тестов, так и анализа данных опытно-методических работ говорят о том, что величина смещения времени от выстрела к выстрелу критическим образом влияет на характер шума, и, следовательно, на качество сейсмического материала после проведения процедуры разделения сигналов от перекрывающихся источников. Анализ этих времен обязательно должен проводиться во время контроля качества полевого материала

Заключение

В работе авторами были рассмотрены теоретические и практические аспекты влияния случайной задержки между выстрелами на характер шума, возникающего при полевых работах с перекрывающимися источниками. Продемонстрированы синтетические и реальные примеры с различной задержкой. На основе анализа теории, литературы, полевого материала сделан вывод о том, что необходимо задавать задержку как минимум ± 0.25 с и более в целях получения оптимального распре-

деления случайного (некогерентного) шума от перекрывающихся источников. Кроме того, выполнение опытно-методических работ в регионе показало, что естественных задержек недостаточно для получения необходимых времен смещения и в дальнейшем требуется вводить аппаратную задержку путем создания таблиц случайных задержек для каждого пункта взрыва. Таким образом, при полевых работах с перекрывающимися источниками необходимо включать контроль качества времен выстрелов в стандартный граф полевого контроля данных.

Литература

1. Aaron P., Byerley G., Monk D. Assessing marine 3D seismic acquisition with new technology: A case history from Suriname //SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG, 2016. – С. SEG-2016-13959846.
2. Abma R. Shot scheduling in simultaneous shooting //SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG, 2014. – С. SEG-2014-0812.
3. Abma R., Foster M. S. Simultaneous source seismic acquisition. – Society of Exploration Geophysicists, 2020.
4. Bekara M., Hodges E. Revisiting the Generation of Dither Times in the Context of Blended Marine Seismic Acquisition //85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme). – European Association of Geoscientists & Engineers, 2024. – Т. 2024. – №. 1. – С. 1-5.
5. Berkhout A. J. Seismic Migration: Imaging of Acoustic Energy by Wave Field Extrapolation..: Imaging of Acoustic Energy by Wave Field Extrapolation. – Elsevier, 1982.
6. Brager D., Sonika S., Apeland G. et al. Joint seismic interference and simultaneous source separation in an OBN survey using multi-stage iterative source separation //84th EAGE Annual Conference & Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2023. – Т. 2023. – №. 1. – С. 1-5.
7. 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. – Т. 2021. – №. 1. – С. 1-5.
8. Mahdad A. Deblending of seismic data. Doctoral thesis, TU Delft, Delft University of Technology – 2012.
9. Reinicke Urruticoechea C. Seismic blending and deblending of crossline sources. Master's thesis, TU Delft, Delft University of Technology– 2015.