

А.О. Верпаховская

Институт геофизики НАН Украины, Киев

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОРСКОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЙ МИГРАЦИИ

Статья посвящена методическим вопросам, решение которых непосредственно влияет на результаты последующего этапа интерпретации сейсмических данных, а именно анализа волнового поля, наблюдаемого морской сейсморазведкой методом отраженных волн (МОВ) многократными перекрытиями и графа обработки с применением процедуры миграции.

Рассмотрены возможности повышения качества и эффективности обработки данных морской сейсморазведки МОВ с применением конечно-разностной миграции как до суммы трасс методом общей глубинной точки (ОГТ), так и после нее при изучении особенностей строения приповерхностной части земной коры морских акваторий. Исследования выполнены на примере обработки сейсмических данных, зарегистрированных в 2010–2013 гг. в северо-западной части Черного моря.

Ключевые слова: сейсморазведка, отраженные волны, метод миграции, шельф Черного моря.

Введение

В 2010–2013 гг. на континентальном склоне северо-западного шельфа Черного моря были выполнены комплексные экспедиционные исследования с регистрацией ряда сейсмических профилей МОВ многократными перекрытиями [4, 5], что позволило определить граф обработки данных морской сейсморазведки с применением конечно-разностной миграции как до суммирования трасс методом общей глубинной точки (ОГТ), так и после него.

В процессе обработки сейсмических данных, наблюдаемых в разные годы на северо-западном шельфе Черного моря, сформировался ряд методических вопросов, связанных с характером наблюдаемого поля, его зависимостью от используемой системы наблюдений, а также с поиском возможных путей повышения ка-

© А.О. ВЕРПАХОВСКАЯ, 2017

чества обработки зарегистрированных данных и проверки корректности полученного результата миграции.

Традиционно обработка сейсмических наблюдений подразделяется на: «экспресс» или предварительную обработку, которая может быть выполнена во время регистрации наблюдений, и детальную обработку [3], предусматривающую более точный выбор параметров и включение более сложных процедур, в частности миграции, для повышения качества и точности последующей геологической интерпретации.

При составлении графа обработки сейсмических данных некоторые процедуры являются стандартными и выполняются независимо от системы наблюдений и условий строения среды [7]. В тоже время в связи с существующими различиями между данными, наблюденными морской и наземной сейсморазведкой [6], составление графа обработки требует более тщательного подбора не только отдельных процедур, но и параметров их выполнения. Так, стандартный граф «экспресс» обработки данных сейсморазведки, как правило, состоит из следующих этапов: подготовка сейсмических записей (перевод первичных данных в стандартный формат, редакцию паспортов, исключение из волнового поля не подлежащих обработке частей и т.п.), фильтрация и автоматическое регулирование усиления амплитуд (АРУ), ввод предварительных кинематических поправок и суммирование трасс методом ОГТ.

Для выбора параметров фильтрации волнового поля необходимо учитывать, что при сейсмических наблюдениях на акваториях достаточно сильной помехой являются многократные отражения в водной толще (реверберация), а также эффект двойного удара, который проявляется в волновом поле в виде дублирующего отражения на расстоянии $0,1-0,4$ с от основного [6]. В общем-то с этими проблемами хорошо справляется деконволюция, которая впервые была предложена Э.А. Робинсоном и которая является по сути операцией свертки [11]. По типу деконволюция может быть предсказывающей (сокращение длительности сигнала происходит за счёт подавления его хвостовой части) и дельта-импульсной (сигнал сжимается до уровня единичного импульса). В результате применения деконволюции сигнал сжимается за счёт уменьшения его длительности. Как показывает практика, деконволюция является необходимой составляющей при «экспресс» обработке данных морской сейсморазведки.

Результатом «экспресс» обработки наблюденного волнового поля является временной разрез суммы трасс ОГТ, который дает возможность предварительно оценить уровень сложности строения изучаемого разреза и определить процедуры и параметры детальной обработки наблюденных волновых полей. Таким образом, заключительным этапом «экспресс» обработки данных морской сейсморазведки МОВ многократными перекрытиями является суммирование трасс методом ОГТ.

Хотя методика суммирования трасс методом ОГТ была предложена достаточно давно [10], она и сейчас успешно применяется при обработке данных МОВ многократными перекрытиями, что объясняется как простыми теоретическими основами, так и скоростью получения предварительной информации о строении разреза. Кроме того, метод ОГТ обладает высокой помехоустойчивостью и, как правило, на временных разрезах суммы ОГТ кратные волны либо отсутствуют, либо могут быть достаточно хорошо подавлены.

Детальная обработка в современной сейсморазведке не обходится без миграции, применение которой позволяет сформировать изображение геологической среды в динамических характеристиках наблюдаемого волнового поля и тем самым способствует повышению уровня интерпретации сейсмических данных. По отношению к размещению в графе обработки миграция бывает до и после суммирования трасс методом ОГТ (в английском варианте pre- и poststack migration) [8].

Миграция после суммы ОГТ необходима для коррекции глубинного положения целевых объектов разведки по глубине или времени, в зависимости от типа результативного разреза. Но при детальном изучении сложных геологических сред более предпочтительной является миграция до суммы, хотя данный вариант требует гораздо больше компьютерных ресурсов и времени.

В теоретической основе любого метода миграции лежит решение волнового уравнения, и по методу его решения миграция может быть: Кирхгоффа, в спектральной области, и конечно-разностной. Конечно-разностная миграция является наиболее устойчивой и корректной независимо от сложности распределения скоростной функции в изучаемой среде, что подтверждается и в научной литературе [9, 12].

Разные варианты конечно-разностной миграции разработаны в Институте геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины и успешно применяются при обработке данных морской сейсморазведки, наблюдаемых на шельфах Черного и Азовского морей [1]. Одной из последних разработок является оригинальная конечно-разностная полноволновая миграция, которая основана на решении волнового уравнения с применением трехмерной пространственно-временной сетки с 12-точечным шаблоном, что обеспечивает высокую степень аппроксимации дифференциального уравнения конечно-разностным, а также гарантирует устойчивость решения и точность полученного результата [2].

Для демонстрации эффективности разработанного графа обработки данных морской сейсморазведки, наблюдаемых в северо-западной части Черного моря в 2010–2013 годах, было выполнено сравнение результатов, полученных при применении конечно-разностной полноволновой миграции суммы ОГТ, конечно-разностной миграции до суммы и с применением стандартного варианта миграции, реализованной в специализированной системе обработки данных сейсморазведки ProMax, которая является одной из наиболее используемой в производственных геолого-геофизических организациях Украины.

Поскольку системы наблюдений в северо-западной части Черного моря в 2010–2013 годах отличались между собой, выполненные исследования позволили как объединить результаты обработки всех профилей для получения более полной информации о глубинном строении среды, так и дать оценку системам наблюдений, которые при этом применялись, а также рассмотреть ряд методических вопросов. Результаты исследований подтверждаются практическими примерами.

Граф обработки данных морской сейсморазведки, наблюдаемых на северо-западном шельфе Черного моря

Прежде всего, необходимо сказать, что морские сейсмические наблюдения имеют свою специфику по сравнению с наземными. Это связано как с разницей в аппаратуре, которая используется для возбуждения и приема сейсмических колебаний, так и с характером зарегистрированного волнового поля [1]. Анализ наблюдаемого волнового поля позволяет выделить полезный сигнал на фоне волн-помех, оценить качество регистрации и возможность обработки, а также подобрать при составлении графа необходимые процедуры и методы.

На рис. 1 приведен граф обработки данных морской сейсморазведки, который был применен к зарегистрированным волновым полям на северо-западном шельфе Черного моря. При этом для формирования изображения геологической среды в глубинном масштабе были выбраны два варианта конечно-разностной полноволновой миграции: после суммирования трасс методом ОГТ и до суммирования или миграция по исходным сейсмограммам. Миграция является не только стандартной процедурой в современной обработке сейсмических наблюдений, но также именно от результата ее применения зависит качество дальнейшей интерпретации.

Рассмотрим особенности применения отдельных этапов предложенного графа обработки.

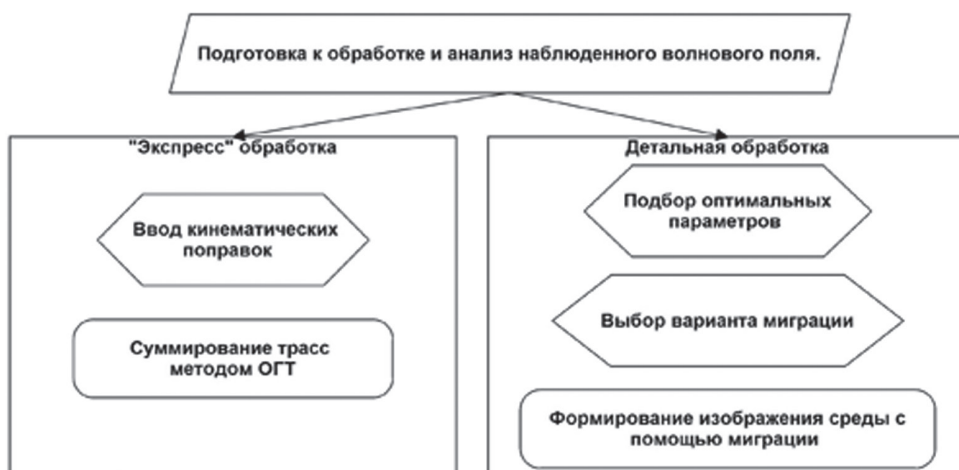


Рис. 1. Граф обработки данных морской сейсморазведки с применением метода миграции

Анализ и подготовка к обработке наблюдаемого волнового поля, зарегистрированного с применением разных систем наблюдения при морской сейсморазведке в северо-западной части шельфа Черного моря

Системы наблюдений, которые применялись при выполнении сейсмических работ при комплексных исследованиях северо-западной части шельфа Черного моря в разные годы их проведения отличались между собой в зависимости от оборудования, которое находилось в распоряжении исполнителей.

Соответственно менялся и характер наблюдаемого волнового поля. На рис. 2 приведены примеры волнового поля одного пункта возбуждения, зарегистрированного в разные года проведения сейсмических наблюдений.

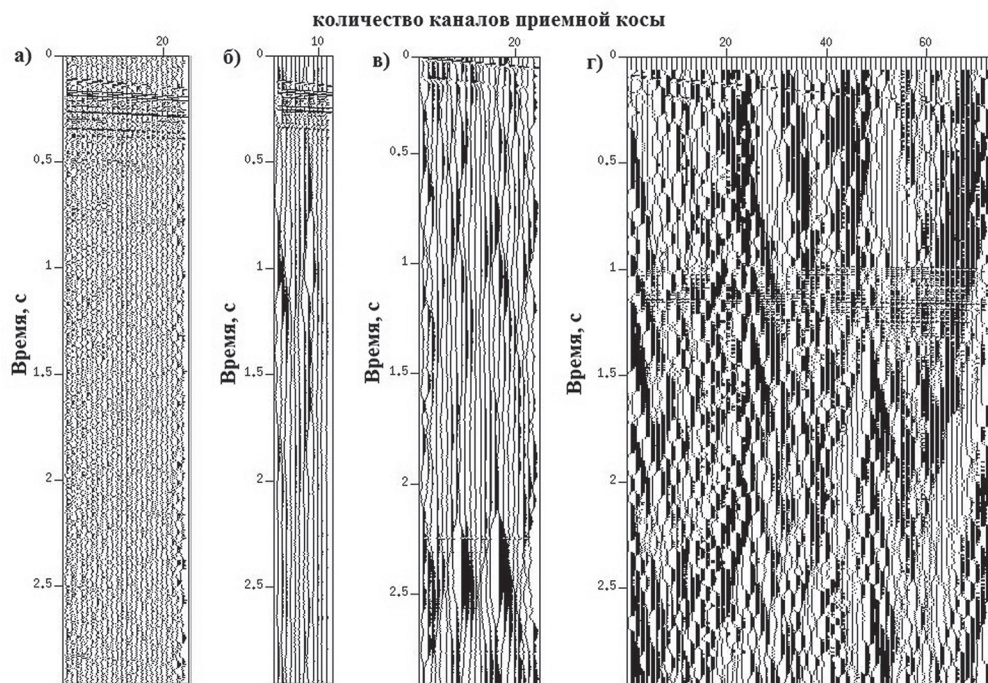


Рис. 2. Примеры волнового поля одного пункта возбуждения, зарегистрированного в: а) 2010 г. — 24-канальной косой; б) 2011 г. — 12-канальной косой; в) 2012 г. — 24-канальной косой; г) 2013 г. — 72-канальной косой (три 24-канальные косы)

В 2010 и 2013 годах регистрация колебаний выполнялась с использованием одной 24-канальной приемной косы, а в 2011 году из этих 24 каналов, работало всего 12, поэтому запись получилась 12-канальной. Наиболее полные наблюдения выполнялись в 2013 году, когда были использованы три 24-канальные косы с общей 72-канальной записью.

Сравнение волновых полей, показанных на рис. 2, позволяет определить разницу в шумовых составляющих и, что является очень принципиальным при обработке сейсмических данных, определить возможные пути их удаления, а именно выбор типа фильтра и оптимальные его параметры. При этом необходимо выделить частоту полезного сигнала на фоне общего шума и, по возможности, усилить сам сигнал. Как правило, для этого определяют спектр волнового поля. Поскольку волновые поля, зарегистрированные в 2011–2013 гг., по шумовым составляющим достаточно похожи (рис. 2 б–г), то на рис. 3 приведены только спектры волновых полей, изображенных на рис. 2 а и рис. 2 г.

По спектрам видно, что зарегистрированное волновое поле имеет очень сильные шумы. В тоже время можно заметить и значительную разницу между двумя спектрами, которая состоит в том, что на рис. 3 б нет четкой границы полезного сигнала в спектре. Это может быть связано как с некорректной настройкой ап-

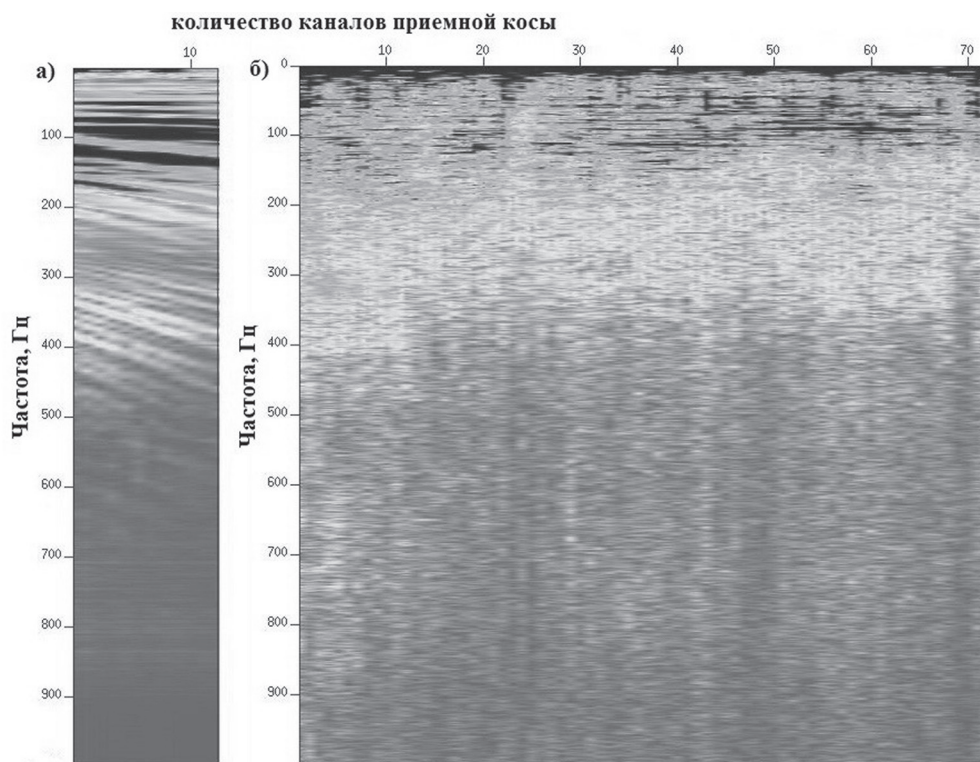


Рис.3. Спектры волновых полей, изображенных на: а) рис.1 а и б) рис.1 г

паратуры, так и со сбоями в программном обеспечении регистрирующего оборудования, что привело к ошибкам при переводе аналоговой записи в цифровую. Если учитывать, что параметры фильтрации определяются с целью выделения частоты полезного сигнала (самый темный цвет на спектре), то в данном случае подбор оптимальных параметров при фильтрации был осложнен зашумлением наблюдаемого волнового поля сильными помехами.

Кроме фильтрации определенный вид шумов может быть подавлен с помощью применения деконволюции. Данная процедура позволяет удалить такие шумы как реверберация, а также дублирующие отражения от источника, которые связаны с выходом на поверхность водной толщи газового пузыря. Появление дублирующих отражений объясняется следующим. После взрыва пневматической пушки в воде образуется пузырь, который пульсируя поднимается на поверхность и порождает дополнительные волны. Эти волны, отражаясь, возвращаются на поверхность, где регистрируются приемниками.

В качестве примера действия деконволюции и фильтрации на характер наблюдаемого волнового поля, на рис. 4 показана часть одного из профилей без применения каких-либо процедур и с применением деконволюции и фильтрации. Волновое поле после деконволюции и фильтрации (рис. 4 в) готово для дальнейшей обработки.

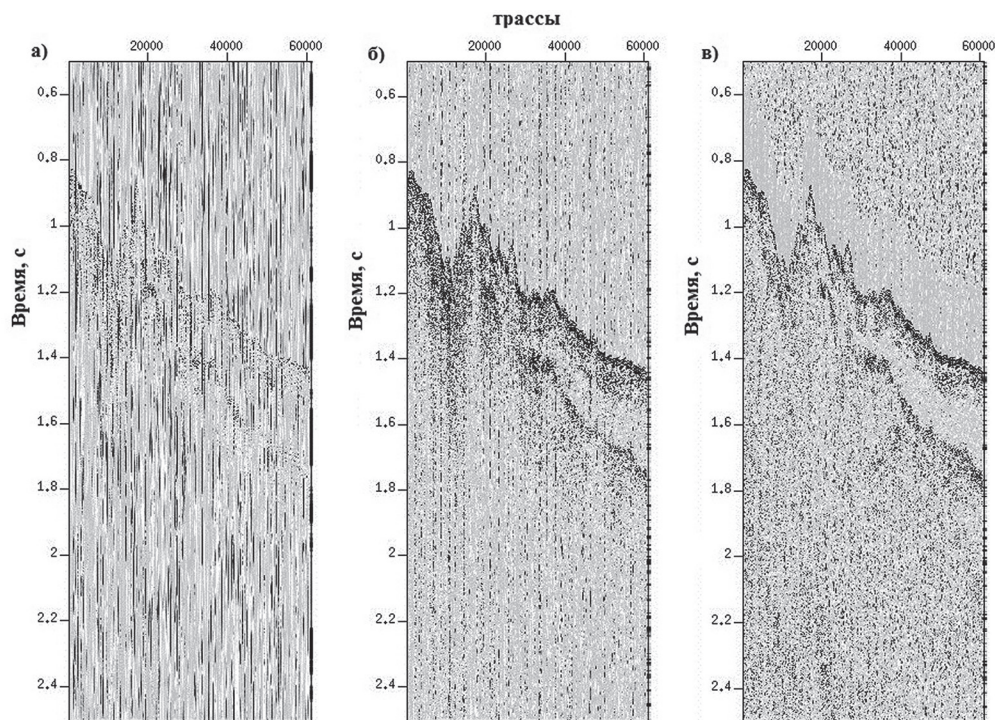


Рис.4. Часть наблюдаемого волнового поля одного из морских профилей: а) исходное волновое поле; б) после применения деконволюции; в) после применения фильтрации

Суммирование трасс методом ОГТ

Завершающим этапом экспресс обработки является суммирование трасс методом ОГТ. Сумма ОГТ уже достаточно долгое время является основным результатом первичной обработки данных МОВ многократными перекрытиями. Перед суммированием необходимо в исходное волновое поле внести кинематические поправки, которые зависят от скорости распространения волн в изучаемой среде. Для определения априорных значений распределения скорости в разрезе, как правило, применяют перебор скоростей. Поскольку исследования проводились с целью изучения строения приповерхностной части земной коры на морской акватории, то, прежде всего, необходимо было учитывать скорость распространения волн в морской воде, которая может меняться в пределах от 1440 м/с до 1540 м/с, в зависимости от температуры и солености воды.

При обработке данных вдоль профилей, которые были зарегистрированы в 2013 году возникла проблема неэффективности использования всего наблюдаемого волнового поля при суммировании трасс. Как было отмечено ранее, в системе наблюдений были задействованы три 24-канальные косы и общая длина записи для одного пункта возбуждения составляла 72 трассы или по расстоянию в диапазоне от 90 м до 306 м от источника. В сейсморазведке в методе отраженных волн многократными перекрытиями считается, что чем больше трасс в записи, тем больше накопления за точкой ОГТ и тем четче и лучше должен быть результат обработки. Однако в нашем случае это не совсем соответствовало действительности.

На рис. 5 показаны результаты применения суммирования трасс по ОГТ для части одного из профилей, при этом использовались части наблюдений, которые соответствовали 12, 24, 48 и 72 каналам регистрации. Анализ результатов показывает, насколько сильно влияет изменение количества приемников в сейсмической косе при суммировании трасс на результат обработки. Это свидетельствует о том, что при выполнении наблюдений комплексная составляющая сигнала была

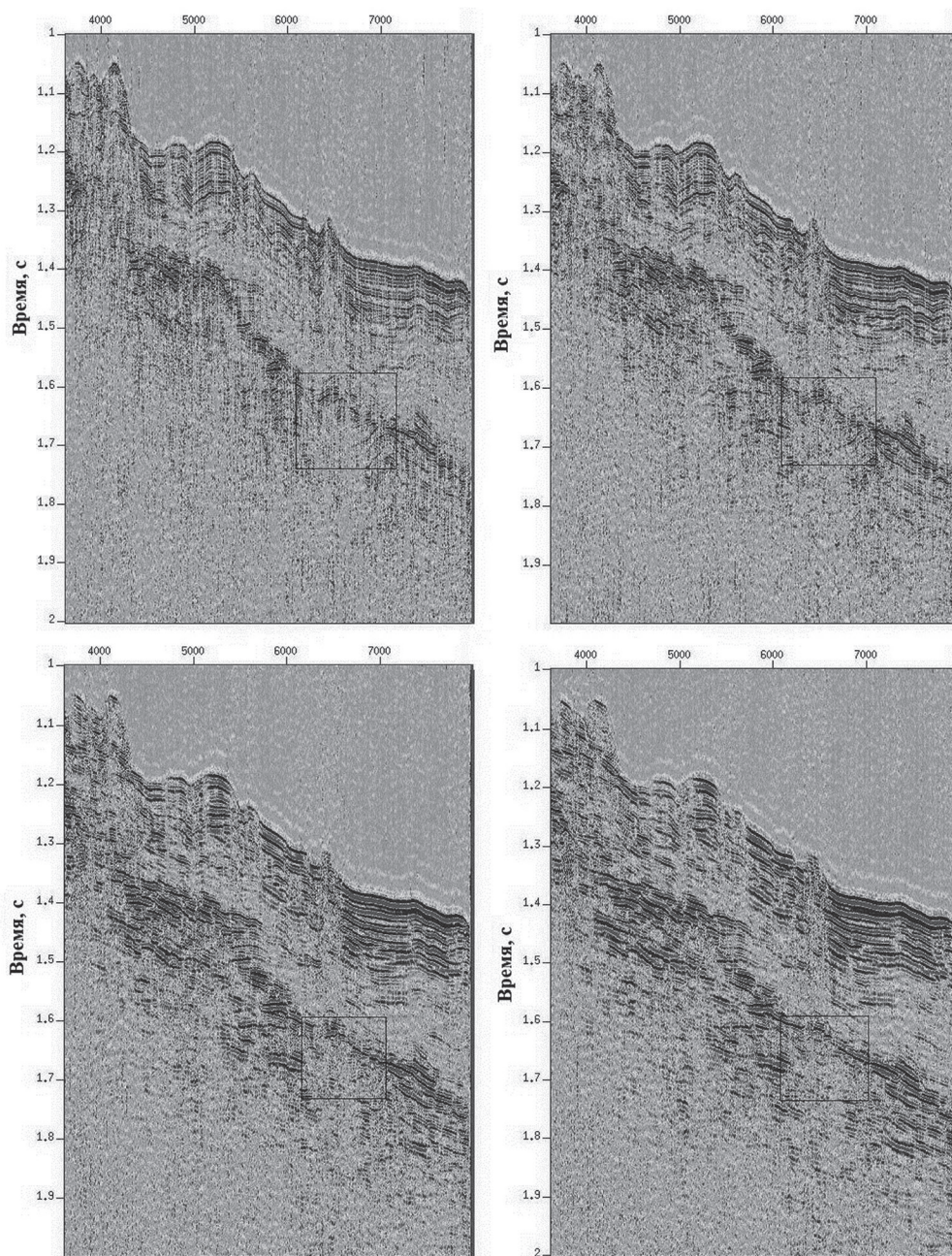


Рис.5. Сумма ОГТ для части одного из профилей для: а) 12, б) 24, в) 48 и г) 72 каналов регистрации

очень сильной и поэтому сам сигнал является разбитым, что усиливается с расстоянием от источника. При этом разница в результатах более заметна с ростом глубины. Ярким примером этого служит выделенная прямоугольником деталь на всех приведенных на рис. 5 суммах ОГТ, которая при использовании всего волнового поля в 72 канала почти полностью заглаживается. Кроме того, строение района исследований очень сложное, что также может сказываться на результате суммирования трасс методом ОГТ.

Изображение структуры приповерхностной части земной коры шельфа Черного моря по сейсмическим наблюдениям с применением метода миграции

Поскольку строение приповерхностной части земной коры в северо-западной части Черного моря имеет сложное строение, миграционный разрез даёт более подробный и информативный результат по сравнению с суммой ОГТ для дальнейшей интерпретации. Однако для получения наиболее четкого результата при формировании глубинного изображения разреза необходимо выбрать вариант миграции, который позволит корректно отобразить все особенности строения района исследований.

Так как при обработке сейсмических морских профилей, наблюдаемых, северо-западной части Черного моря в 2010–2013 гг., в графе использовался конечно-разностный метод миграции, то для демонстрации его эффективности при изображении глубинного строения района исследований было выполнено сравнение полученных результатов с результатами применения стандартной миграции Кирхгоффа, которая реализована в системе обработки ProMAX. На рис. 6 для сравнения результатов обработки сейсмических данных приведены части одного из профилей с применением разных вариантов миграции. Рисунок демонстрирует, что конечно-разностная миграция по исходным сейсмограммам (рис. 6 в и рис. 6 г) дает наиболее детальное изображение строения разреза ниже морского дна, но при этом качество ее результата также зависит от тех параметров, которые при этом задаются. Так на рис. 6 г были выбраны меньшие шаги по сетке, как по глубине, так и по времени, что позволило получить более информационный результат, показывающий особенности строения района исследований.

Для контроля заданных скоростей для миграции, а значит глубины результативного разреза после применения миграции, можно использовать данные, фиксируемые эхолотом. Такой контроль непосредственно влияет на выбор значений скорости в среде, задаваемых для ввода кинематических поправок при суммировании трасс методом ОГТ, а также используемых при миграционных преобразованиях волнового поля. Сама процедура миграции позволяет выделять не только контуры отдельных границ, но и строение всего разреза. Поскольку первой границей раздела в разрезе морских сейсмических наблюдений является дно моря, то благодаря данным, зафиксированным эхолотом, есть возможность проконтролировать его глубинное положение на изображении, что позволяет определить корректность выбранных скоростных параметров для миграции. Такой подход не только гарантирует увеличение точности сформированных изображений геологической среды, но также и дает более корректный результат обработки для дальнейшей интерпретации данных сейсморазведки.

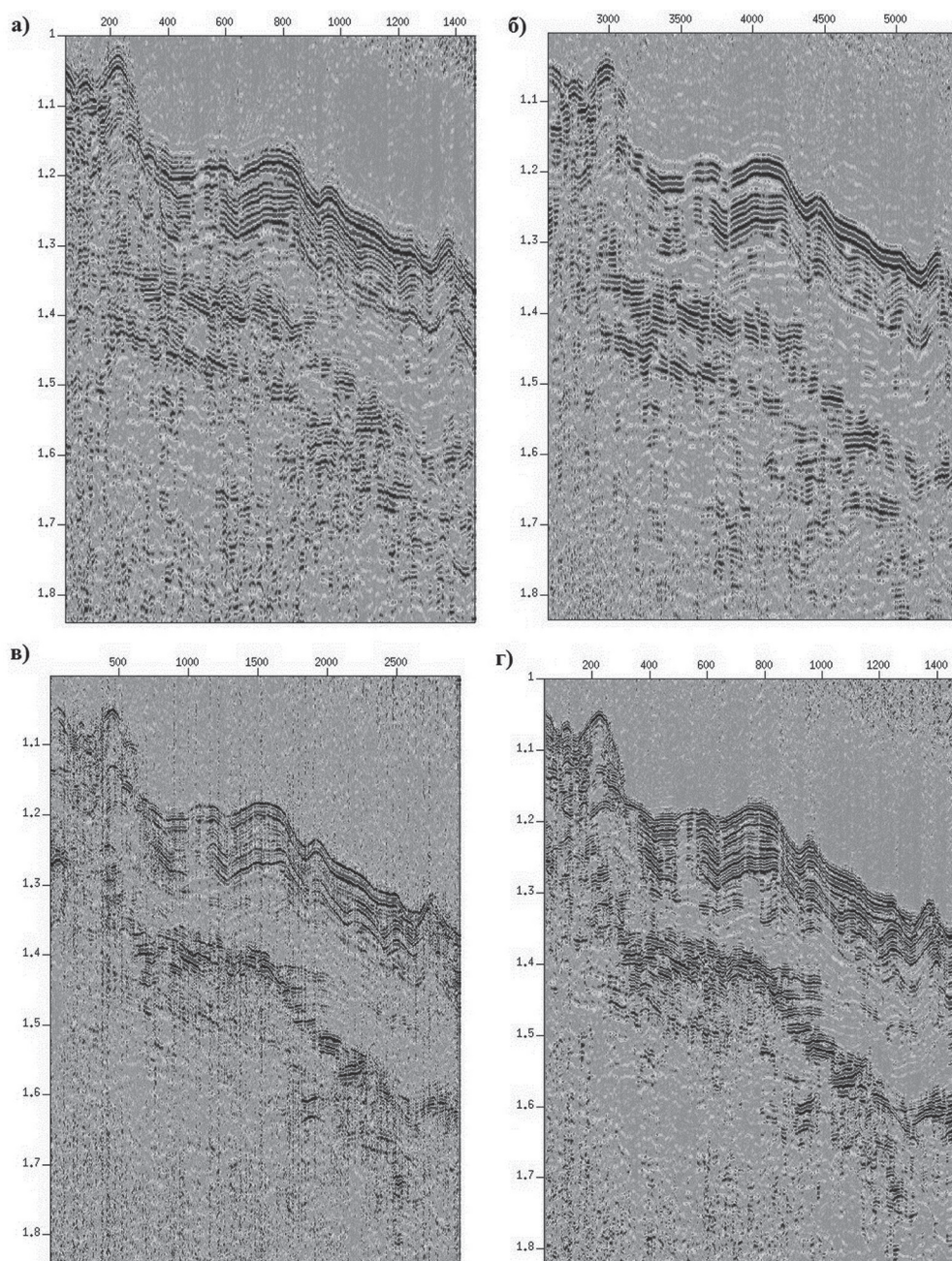


Рис. 6. Результаты применения разных вариантов миграции: а) конечно-разностная после суммы; б) миграция Кирхгофа после суммы; в) и г) конечно-разностная миграция по исходным сейсмограммам с разными параметрами миграции

На рис. 7 показано сравнение данных эхолота и глубинное изображение приповерхностной части разреза, полученное с применением миграции для части одного из профилей, наблюдаемых в 2013 году. К большому сожалению, не на всех профилях, наблюдаемых в 2010–2013 гг. в северо-западной части Черного

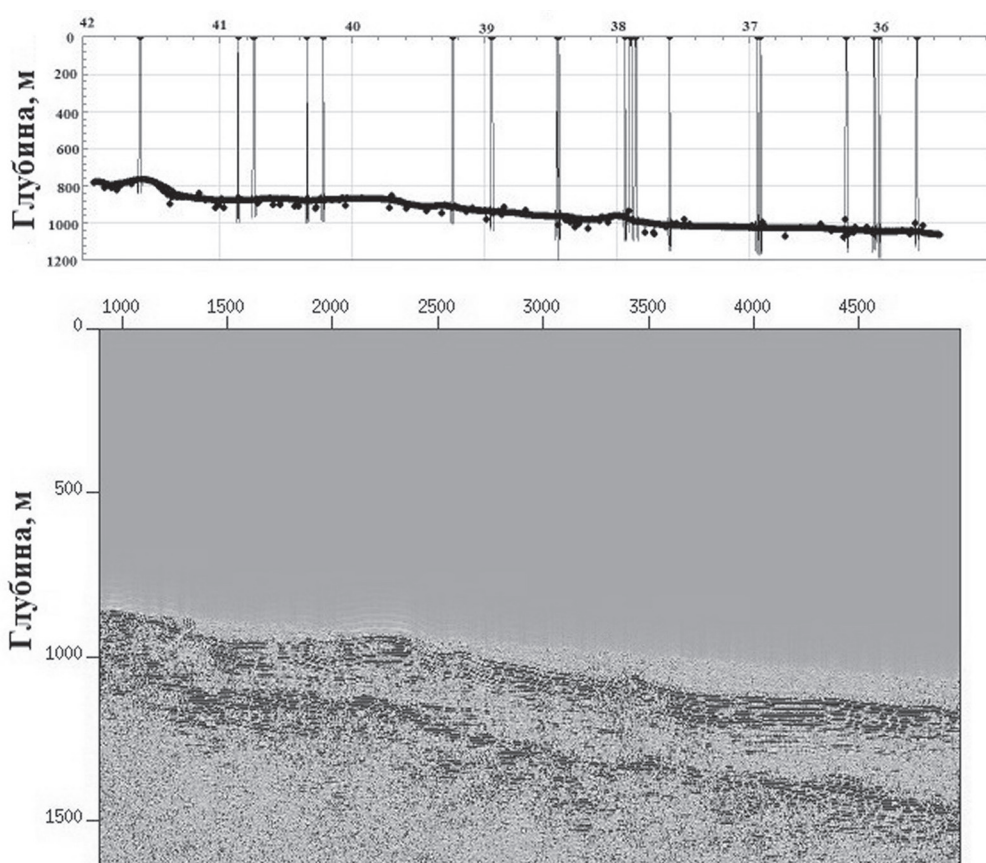


Рис. 7. Сравнение данных, полученных эхолотом (верхняя часть рисунка) и результата конечно-разностной миграции (нижняя часть рисунка)

моря, есть возможность выполнить подобный контроль, но тем не менее в дальнейшем необходимо учитывать возможность подобного использования данных, зарегистрированных эхолотом.

Выводы

Результаты обработки и интерпретации сейсмических наблюдений непосредственно зависят от качества зарегистрированного волнового поля, от системы и параметров наблюдений. Поэтому любые сейсмические данные необходимо тщательно анализировать и оценивать возможность получения при их обработке как можно большей информации о строении границ раздела и целевых объектов разведки. При этом очень важным моментом является выбор процедур для составления графа обработки наблюденных волновых полей, особенно их детальной обработки.

Выбор варианта сейсмической миграции, от которой напрямую зависит корректность и четкость сформированного изображения среды, а, следовательно, информативность и точность результата дальнейшей интерпретации данных сейсморазведки, зависит от системы наблюдений и условий глубинного стро-

ения изучаемой среды. При обработке данных, наблюдаемых в 2010–2013 гг. в северо-западной части Черного моря, наиболее детальное изображение было сформировано при помощи конечно-разностной миграции до суммы, что продемонстрировано на примерах. В то же время результат применения конечно-разностной миграции до суммы зависит от заданных параметров, что необходимо учитывать при формировании детального изображения геологического разреза со сложным строением.

Контролировать заданные параметры обработки, в частности, значения скорости, от чего зависит глубинное положение границы дна и всех остальных деталей строения исследуемого разреза на сформированном миграционном изображении, позволяет сравнение данных, зарегистрированных эхолотом и результата применения конечно-разностной миграции. Такой контроль дает возможность подтвердить корректность и точность сформированного глубинного изображения среды с применением миграции, что в свою очередь улучшит достоверность интерпретации данных сейсморазведки. Учитывая результаты выполненных исследований, можно значительно повысить эффективность обработки и интерпретации данных морской сейсморазведки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верпаховская А.О., Пилипенко В.Н., Коболев В.П. Особенности обработки морских сейсмических наблюдений с использованием конечно-разностной полноволновой миграции. *Геофиз. журнал*. 35. №5. 2013. С. 187–195.
2. Верпаховская А.О., Сидоренко Г.Д., Пилипенко В.Н., Пилипенко Е.В. Миграция исходных сейсмограмм и моделирование волнового поля конечно-разностным методом с распараллеливанием процесса вычислений на кластере. *Геоинформатика*. 2013. №3(47). С. 47–58.
3. Дядюра В.А., Турчаненко Н.Т., Кившик Н.К., Будкевич В.Б., Золотаренко В.Я., Петрик Д.В., Рева А.Ф., Сергей Г.Б. Обработка сейсмической информации на ЭВМ. Киев: Техника. 1980. 183 с.
4. Коболев В.П., Буртный П.А., Верпаховская А.О., Довбыш С.Н., Жук В.Ф., Любицкий А.А., Михайлюк С.Ф., Чулков С.С., Ящота Д.О. 71-й рейс НИС «Профессор Водяницкий» - комплексные экспедиционные исследования в западной части Черного моря. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. № 4 (26). 2011. С. 94–99.
5. Коболев В.П., Чулков С.С., Ганиев А.З., Козленко Ю.В., Захаров И.Г., Любицкий А.А., Игнатъев С.М. 74-й рейс НИС «Профессор Водяницкий» - комплексные экспедиционные исследования на континентальном склоне северо-западного шельфа Черного моря. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2013. №3. С. 175–180.
6. Орленок В.В. Морская сейсмоакустика: Учеб. пособие. Калининград. 1997. 150 с.
7. Полшков М.К., Козлов Е.А., Мешбей В.И., Крейсберг В.М., Борковский Г.М., Цукерник В.Б., Климович Н.И., Иванов В.А., Табаков Г.Г. Системы регистрации и обработки данных сейсморазведки. М.:Недра. 1984. 381с.
8. Bancroft J.C. A Practical Understanding of Pre- and Poststack migration. V.1 (Poststack). Issue 13 of Course notes series. SEG Books, 2007. 486 p.
9. Han, B. A. Comparison of four depth-migration methods. *B. Han. 68-th Ann. Internat. Mtg. SEG*. 1998. P. 1104–1107.
10. Mayne, W. H. Horizontal data stacking techniques. *Supplement to Geophysics*. 1962. 27. P. 927–938.
11. Silvia M.T., Robinson, E.A. Deconvolution of Geophysical Time Series in the Exploration for Oil and Natural Gas. *Developments in petroleum science*. 10. Amsterdam: Elsevier. 1957. 251 p.
12. Sinha, D.P., Vishnoi, D.K., Basu, S., Singh, V.P. A brief comparison of the efficacy of four migration algorithms – a sub-basalt example. *Geohorizons*. SPG. India. 2009. P. 24 – 27.

Статья поступила 16.06.2017

О.О. Верпаховська

ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБРОБКИ ДАНИХ МОРСЬКОЇ СЕЙСМОРОЗВІДКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КІНЦЕВО-РІЗНИЦЕВОЇ МІГРАЦІЇ

Статтю присвячено методичним питанням, рішення яких безпосередньо впливає на результати інтерпретації сейсмічних даних, а саме аналізу хвильового поля, спостереженого морською сейсморозвідкою методом відбитих хвиль (МВХ) багаторазовими перекриттями та графа обробки із застосуванням процедури міграції.

Розглянуто можливості підвищення якості й ефективності обробки даних морської сейсморозвідки МВХ із застосуванням кінцево-різницевої міграції як до суми трас методом загальної глибинної точки (ЗГТ), так і після неї при вивченні особливостей будови приповерхневої частини земної кори морських акваторій. Дослідження виконано на прикладі обробки сейсмічних даних, зареєстрованих в 2010–2013 рр. у північно-західній частині Чорного моря.

Ключові слова: сейсморозвідка, відбиті хвилі, метод міграції, шельф Чорного моря.

О.О. Verpakhovska

EFFICIENCY OF MARINE SEISMIC DATA PROCESSING WITH APPLICATION FINITE-DIFFERENT MIGRATION

The article is devoted to methodological questions, the solution of which directly affects the results of the seismic data interpretation, such as the analysis of the wave field observed by seismic reflection method and a graph of the processing using the migration procedure.

The possibilities of improving the quality and efficiency of the marine seismic data processing with the use of finite-difference pre- and poststack migration to study the features of the structure of the near-surface part of the earth's crust of marine areas are considered. The studies were performed on the example of seismic data processing registered in 2010–2013 in the northwestern part of the Black Sea.

Keywords: seismic survey, reflected waves, method of migration, shelf of the Black sea.