

УДК 550.834.05

Повышение эффективности региональных сейсмических исследований в сложнопостроенных средах с использованием технологии продольно-непродольного профилирования (широкого профиля)

■ Шушкевич Н.Ю., Гоц И.А., Каплан С.А., Лебедев Е.Б., ФГБУ «ВНИГНИ», г. Москва.

■ Силаенков О.А., ООО «Сейсмотек», г. Москва.

Аннотация. Рассмотрены преимущества системы наблюдения широкого профиля (ШП) над классическим 2D на примере исследований, выполненных в 2025 году в условиях солянокупольной тектоники Прикаспийской впадины. Показано, что данная система наблюдения за счет возможности применения процедур 3D обработки данных, в частности – глубинной миграции до суммирования (PSDM-3D), позволяет повысить геологическую информативность результатов сейсморазведки на этапе региональных геологоразведочных работ (ГРП) в сложных сейсмогеологических условиях. Предложены возможные направления дальнейшего совершенствования методики – добавление линий воздействия и комбинирование ШП с классическим 2D-профилированием.

Ключевые слова: региональные ГРП, сейсморазведка, широкий профиль, ШП, глубинная миграция до суммирования, PSDM-3D, солянокупольная тектоника, подсолевой комплекс, Прикаспийская впадина, Астраханский свод, Заволжский прогиб.

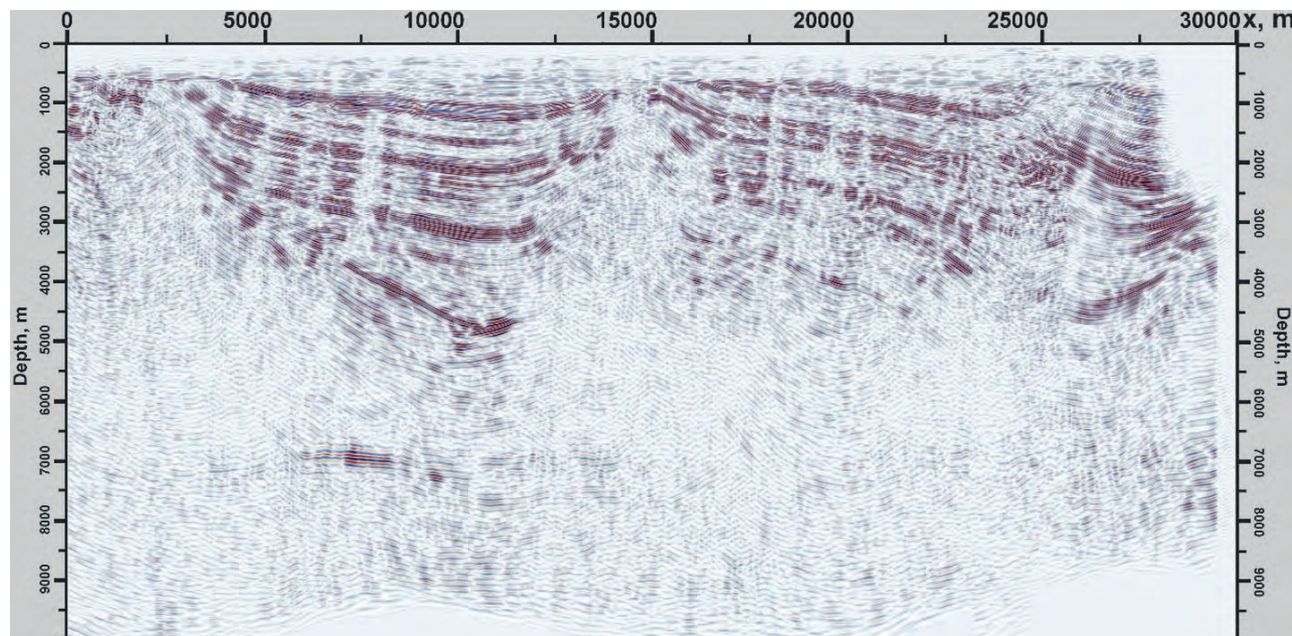
Введение

В условиях существенного сокращения объемов глубокого бурения на региональном этапе геологоразведочных работ (ГРП) возрастают требования к информативности ведущего метода исследований – сейсморазведки МОВ-ОСТ, в его наиболее распространённом профильном (2D) варианте. В последние годы удовлетворение этих требований достигается за счёт увеличения как кратности наблюдений, так и удалений источник - приёмник, обеспечивающих, наряду с высоким качеством получаемых результатов, повышение глубинности исследований. Подобное решение эффективно при изучении сред с относительно простым геологическим строением и пологим залеганием границ, в которых влияние пространственных локальных неоднородностей незначительно. В средах более сложного строения оно недостаточно. Оптимальным в этих условиях было бы использование наблюдений 3D, однако с учётом экономических и экологических факторов целесообразен компромиссный

вариант системы наблюдений – сейсморазведка 2D в модификации широкого профиля (ШП). Накопленный к настоящему времени опыт использования этой технологии свидетельствует о её эффективности, по крайней мере, как средства для подавления волн, приходящих не из плоскости профиля (боковых волн) и для улучшения прослеживания отражений, связанных с глубокими границами [6, 8].

Система наблюдений ШП в дополнение к обычному 2D-профилированию описывается шириной полосы и количеством линий приёмников и источников. Выбор параметров системы наблюдения, помимо представлений об особенностях строения среды, определяется поверхностными условиями, доступными техническими средствами, а также – ограничениями, связанными с экологией и хозяйственной деятельностью на исследуемой территории [2, 3].

Стандартная система наблюдений ШП состоит из одной линии воздействий (ЛВ) и ряда симметрично-расположенных от-



▲ Рис. 1. Пример разреза после глубинной миграции до суммирования по данным сейсморазведки 2D в условиях солянокупольной тектоники. При хорошем качестве изображения в надсолевом комплексе отражения в подсолевом комплексе практически не прослеживаются (обработка 2025 г.).

носителем не параллельных линий приёма (ЛП). Обычно, линия воздействия совмещается с центральной линией приёма.

Существует и альтернативный подход к проектированию систем наблюдения широкого профиля. В [8], в условиях Предуральяского прогиба, использовалась обращённая система ШП: регистрация колебаний производилась на одной линии, а пункты воздействия (ПВ) располагались на перпендикулярных к ней семи линиях, с увеличенным шагом по профилю (200 м) и с расстояниями между ПВ по линии (100 м). Такая система наблюдения представляет собой некоторый аналог системы «крест» при сейсморазведке 3D.

В [9], в юго-восточной части Восточно-Европейской платформы, была использована система наблюдения, состоящая из четырех приемных линий, разнесенных между собой на 100 м, и двух линий источников, совпадающих с центральными приемными линиями. Шаг по ПП вдоль линий составлял 25 м, по ПВ – 50 м.

Исследования эффективности систем наблюдения широкого профиля в более сложных сейсмогеологических

условиях солянокупольной тектоники Прикаспийской впадины средствами полноволнового моделирования представлены в [4]. Смоделированная система наблюдения ШП включала в себя 21 линию приёма (ЛП) в полосе ± 1 км (с шагом 100 м) и 1 линию воздействия (ЛВ), совмещенную с центральной линией приёма. Расстояния между ПП и ПВ составляли 25 и 50 м соответственно, максимальное удаление ПП-ПВ ± 10000 м (на центральной линии). В работе показано, что применение ШП позволяет не только подавить боковые волны, улучшить прослеживаемость отраженных волн и их динамическую выразительность, но и обеспечить более корректное восстановление геометрии отражающих границ. Полученный эффект был достигнут за счёт выполнения обработки сейсмограмм ШП в 3D варианте. Попутно установлено, что, сохраняя ширину полосы широкого профиля, число линий приёма может быть уменьшено до 9 при незначительном снижении качества получаемых результатов.

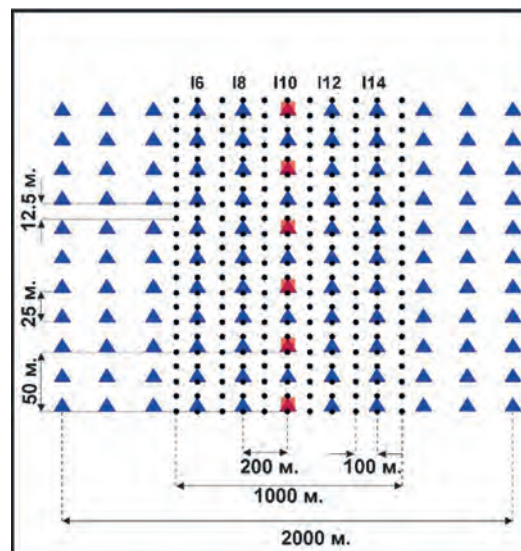
В настоящей статье с опорой на результаты моделирования из [4] представлен

опыт применения модификации ШП на региональном этапе ГРР, в условиях солянокупольной тектоники периферии Астраханского свода, в зоне его сочленения с Заволжским прогибом.

Характерной чертой территории является резкое погружение подсолевого комплекса отложений с 4-5 км в пределах свода до 7-9 км в прогибе и соответствующее этому погружению увеличение мощности соленосной толщи в куполах, а также – глубин мульд между ними [1]. Особенности рельефа соленосной толщи обуславливают значительные искажения годографов волн от подсолевых границ из-за резкого скоростного контраста на её кровле. В подобных условиях основная цель применения ШП заключается в обеспечении качества выделения и прослеживания отражающих границ в подсолевом комплексе, которые при классическом 2D профилировании часто остаются недоступны (рис. 1).

Регион проведения работ характеризуется благоприятными поверхностными условиями (степные, полупустынные участки без резкого изменения рельефа дневной поверхности), что не накладывает ограничений на используемую систему наблюдения (рис. 2). Система

▼ Рис. 2. Схема отработанных широких профилей на фоне фрагмента Геологической карты РФ.



▲ Рис. 3. Геометрия системы наблюдения широкого профиля. Синим – приемники, красным – источники, черным – точки ОСТ. I6...I14 – номера линий широкого профиля.

наблюдений ШП – центрально-симметричная с переходом в начале и окончании профиля в ассиметричную, вплоть до фланговой, состоит из 11 линий приёма, разнесенных между собой на 200 м (ширина полосы ШП 2000 м) с шагом ПП – 25 м. Линия ПВ совмещена с центральной линией ПП, шаг по ПВ – 50 м. Максимальные удаления источник-приемник по центральной линии составили ± 8000 м (рис. 3).

Для воздействия использовались вибрационные источники NOMAD по 3-4 в группе. Генерировался линейный свип-сигнал длительностью 20 с в диапазоне частот от 8 до 80 Гц.

Для регистрации использовались сейсмоприёмники GS-20DX (по 6 шт. на базе 12.5 м), длительность коррелограммы – 16 с.

Обработка полученных материалов до миграции выполняется в программном комплексе Prime (ООО «Сейсмотек») по стандартному для региональных ГРР графу. Весь граф сигнальной обработки состоит из более чем 20 пунктов, однако, в рамках статьи, ограничимся перечислением только основных процедур: пре-

процессинг (отбраковка нулевых трасс, ввод поправки за учет геометрического расхождения, подавление амплитудных выбросов (спайков)); учет верхней части разреза по преломленным волнам; подавление конуса поверхностных волн и линейных помех; подавление нерегулярных помех; сигнатурная деконволюция; поверхностно-согласованная деконволюция; подавление кратных волн от дневной поверхности; коррекция поверхностно-согласованных амплитудных и статических поправок (5-6 итераций); скоростной анализ и построение временных разрезов ОСТ. В процессе сигнальной обработки учитывается особенность расстановки, поэтому основная часть процедур применяется в варианте 3D.

Построение глубинно-скоростной модели (ГСМ) и глубинная миграция до суммирования (PSDM) являются ключевым этапом обработки в условиях солянокупольной тектоники. Миграция выполняется по алгоритму Кирхгофа. Построение общей увязанной ГСМ исследуемой территории осуществляется методом послойной кинематической инверсии с использованием технологии кинематико-динамического преобразования, суть которой заключается в определении поля времен на основе анализа остаточной кинематики вдоль горизонтов по мигрированным сейсмограммам. Данный подход обеспечивает итеративное уточнение скоростных параметров и глубин залегания отражающих горизонтов на основе анализа формы годографов отраженных волн с учетом их негиперболической кинематики [5,7].

Особенности построения глубинно-скоростной модели

Исследуемая территория не изучена бурением. Ближайшая скважина, пригодная для определения скоростных характеристик среды, расположена на

удалении более 10 км от отработанных сейсмических профилей. В связи с этим, единственным источником информации о скоростных параметрах геологического разреза являются сами сейсмические данные.

Полный набор удалений присутствует только на центральной линии широкого профиля, где источники и приемники совмещены. На боковых линиях ближние удаления отсутствуют, что делает невозможным проведение по ним устойчивых кинематических оценок для верхней части разреза.

В связи с этим, построение ГСМ верхней части надсолевого комплекса первоначально производится в варианте 2D, по центральным линиям широких профилей. Далее, полученная 2D модель экстраполируется в пределах всей ширины полосы широкого профиля и выполняется первая итерация трехмерной миграции до суммирования. На этом этапе для каждой из 11 линий (где это возможно) производится коррекция глубин залегания отражающих горизонтов. Интервальные скорости при этом не корректируются в силу их незначительных (пренебрежимо малых) изменений в направлении ортогональном профилю.

Процесс построения модели – итеративный и, как правило, для каждого горизонта требуется проведение от 3 до 5 итераций миграции с последующей оценкой остаточной кинематики и решением с ее учетом обратной кинематической задачи. Критерием остановки процесса уточнения служит достаточное спрямление годографов отраженных волн на сейсмограммах общей точки изображения (ОТИ) и отсутствие негеологических кинематических аномалий.

В результате построенная ГСМ надсолевого комплекса в зависимости от профиля и сложности строения пересекаемых им мульд содержит до 11 слоёв, значения интервальных скоростей в ко-

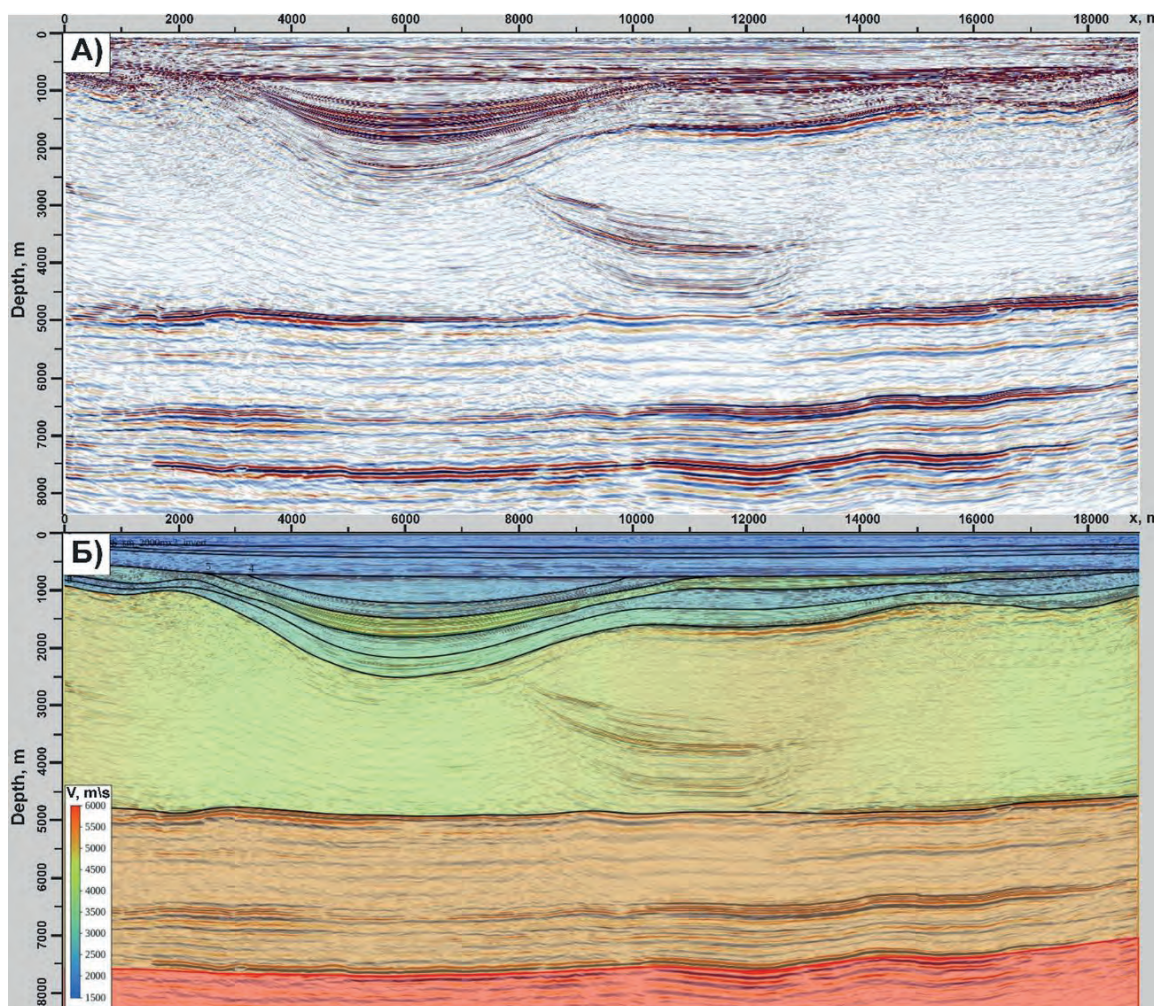
торых в целом увеличиваются с глубиной. Вместе с тем, на части площади выделен слой аномально-высоких интервальных скоростей (до 4000-4300 м/с), связанный с распространением карбонатов. Ниже этого слоя наблюдается значительная инверсия интервальных скоростей – скорости падают до 3200-3500 м/с.

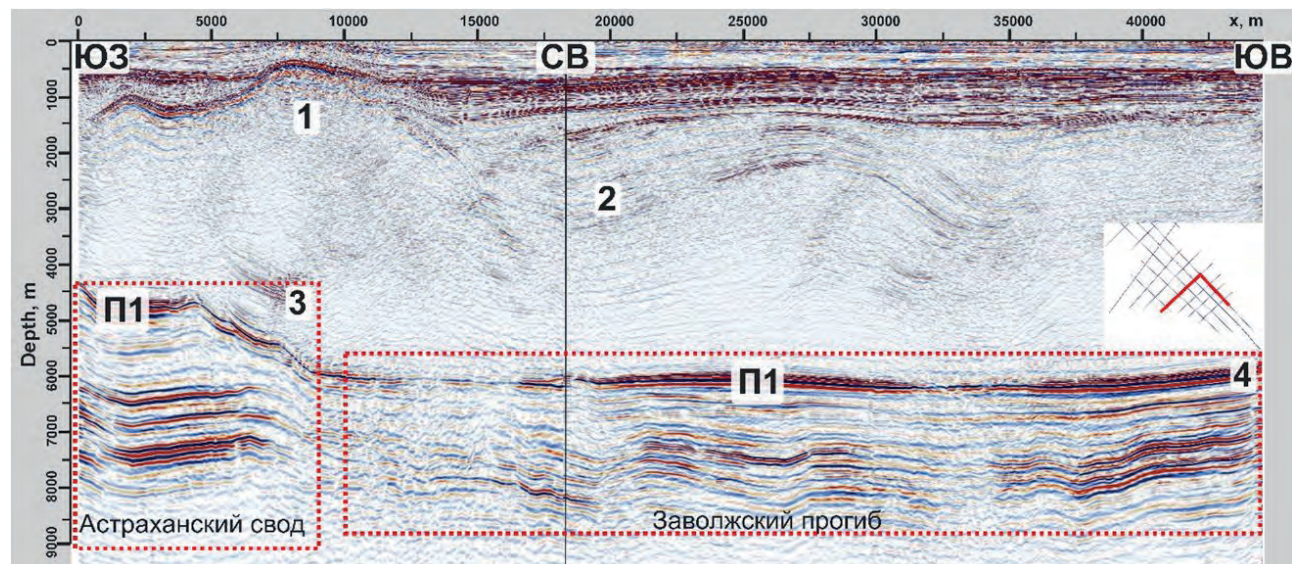
Скоростная характеристика ниже лежащей части разреза определяется в процессе 3D глубинной миграции до суммирования. На части площади наиболее глубокие мульды по своим кинематическим характеристикам слабо отличаются от вмещающих их солей ($V \approx 4400 - 4600$ м/с) и при этом слабо выражены в сейсмическом волновом поле. Опытным путем установлено, что их совместное описание с соленосной толщей в соста-

ве единого эффективного слоя ГСМ позволяет получить лучшее изображение подсолевой толщи по сравнению с раздельным описанием. Использование эффективного слоя позволяет придать рельефу кровли соли более пологий характер, что уменьшает искажающие эффекты преломления на контрастной границе.

Для отражающих горизонтов подсолевого интервала разреза решение обратной кинематической задачи происходит неустойчиво, а сами интервальные скорости определяются с большими погрешностями. В связи с этим для всего подсолевого интервала была задана скорость 5200 м/с. Данное значение интервальной скорости не противоречит наблюдаемым данным (обеспечивает

▼ Рис. 4. Финальный глубинный разрез (А) по одному из профилей после трехмерной глубинной миграции до суммирования (PSDM-3D) и его глубинно-скоростная модель, использованная при миграции (Б).





▲ Рис. 5. Композитный глубинный разрез после глубинной миграции до суммирования, охватывающий структуры Астраханского свода и Заволжского прогиба. Вертикальной линией обозначена точка пересечения. На разрезе: 1 – соляной купол с двумя вершинами; 2 – глубокая мульда, заполненная слабоконтрастными, высокоскоростными осадками; 3 – фрагмент Астраханского свода; 4 – подсолевой комплекс в пределах Заволжского прогиба.

спрямление годографов отраженных волн на сейсмограммах ОТИ) и согласуется с данными бурения за пределами исследуемой территории, в тех скважинах, где эти отложения были вскрыты.

Обработка после миграции производится в два этапа.

На первом этапе по полученным 3D-мигрированным сейсмограммам выполняется подавление остаточных когерентных (кратные, линейные) и некогерентных волн-помех. Далее, с целью расширения амплитудно-частотного спектра записи выполняется нуль-фазовая деконволюция, что обеспечивает повышение вертикальной разрешенности разреза. Затем производится подбор финального мьютинга, позволяющего отсечь участки сейсмограмм с низким соотношением сигнал/шум на больших удалениях и выполняется суммирование для каждой из 11 линий ШП.

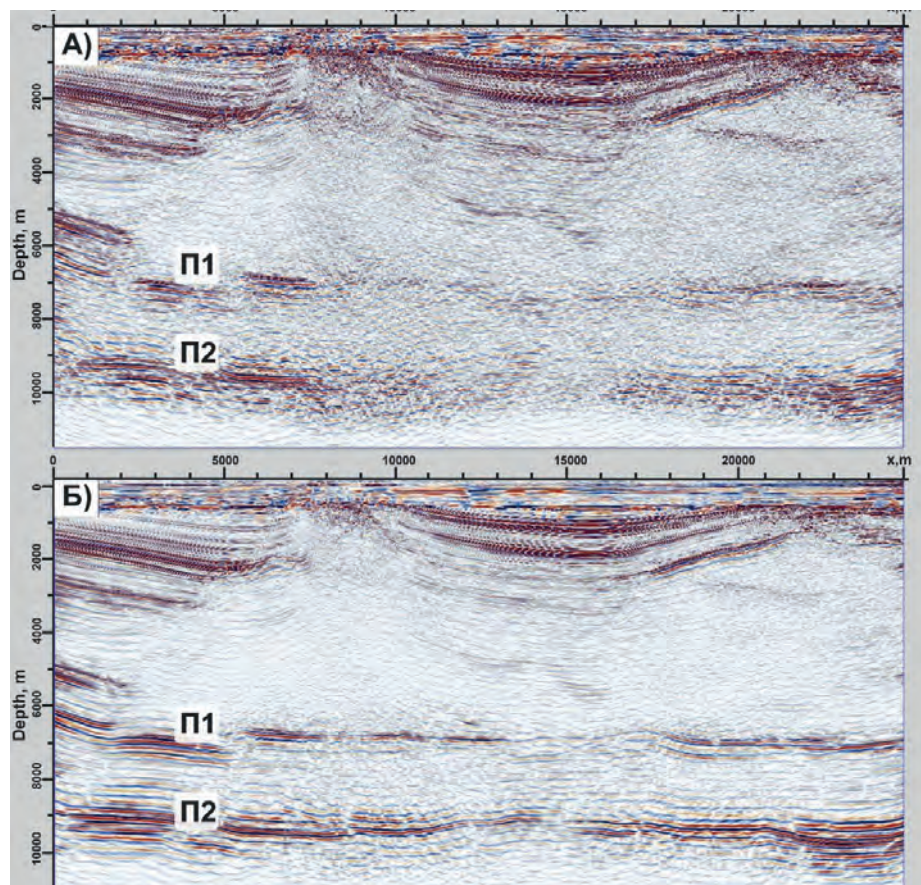
На втором этапе по суммарным разрезам выполняется подавление остаточных некогерентных помех, производится нуль-фазовая деконволюция, обеспечивающая дополнительное сжатие импульса и повышение разрешенности суммар-

ного разреза. Завершающей процедурой является модель-ориентированная когерентная фильтрация, направленная на усиление регулярных отраженных волн.

Финальный вариант разреза после 3D глубинной миграции до суммирования и постмиграционной обработки для центральной линии одного из профилей ШП, представленный в композиции с ГСМ на рис. 4, демонстрирует высокое качество прослеживания и динамическую выразительность отражающих горизонтов, в том числе и в подсолевом комплексе.

Пространственный эффект 3D глубинной миграции иллюстрируется сопоставлением разрезов по пересекающимся профилям ШП непосредственно в зоне сочленения Астраханского свода и Заволжского прогиба (рис. 5).

На композитном разрезе в надсолевом комплексе выделяются крупный соляной купол с двумя вершинами (1) и глубокая мульда, заполненная слабоконтрастными высокоскоростными осадками (2). В подсолевом комплексе прослеживаются фрагменты Астраханского свода в прибортовой зоне (3), где граница П1 залегает на глубине 4,5 км с



◀ Рис.6. Сравнение глубинных разрезов: А – после двумерной глубинной миграции до суммирования (PSDM-2D) и Б – после трехмерной глубинной миграции до суммирования (PSDM-3D).

последующим погружением в сторону Заволжского прогиба до 6,5 км (4).

Преимущество наблюдений ШП с последующим выполнением 3D глубинной миграции перед классическим двумерным профилированием с 2D миграцией показано сопоставлением глубинных разрезов, приведенных на рис. 6А (2D миграция) и рис. 6Б (3D миграция). Из рисунков видно, что надсолевой комплекс на обоих разрезах без существенных отличий, облик же подсолевого комплекса изменяется значительно. В варианте 2D отражения П1-П2 прослеживаются только на части профиля, в то время как в варианте 3D эти же отражения прослеживаются на всей его протяженности.

Важно отметить, что простое накопление в варианте 2D миграции не улучшает прослеживаемость подсолевых отражающих горизонтов. Демонстрируемое преимущество 3D миграции связано с суммированием пространственного годографа, а не только с увеличением кратности наблюдений.

Заключение

Модификация широкого профиля при региональных исследованиях является хорошей альтернативой обыкновенному 2D-профилированию при изучении сложнопостроенных сред – в частности, регионов с развитой солянокупольной тектоникой. В таких условиях 3D глубинная миграция до суммирования позволяет в полной мере использовать преимущества пространственного характера системы наблюдения при формировании изображения глубокозалегающих горизонтов подсолевого комплекса. Для изучения пространственных особенностей этих горизонтов может быть применен анализ разрезов по отдельным линиям ШП.

Дальнейшее совершенствование методики связано с оптимизацией системы наблюдения. При благоприятных поверхностных условиях в качестве меры повышения геологической информативности может быть рассмотрено увеличение числа линий воздействия до трех и бо-

лее (добавлением двух из дополнительных линий по краям расстановки ШП) с увеличением шага по ПВ вдоль линий воздействия с 50 до 100 м. Такая модификация системы наблюдения позволит повысить освещенность среды и увеличить апертуры суммирования в поперечном направлении без существенного удорожания работ.

С экономической точки зрения использование системы наблюдения ШП более чем оправдано. По оценкам авторов увеличение себестоимости полевых работ по рассмотренной технологии по сравнению с затратами на классическое 2D-профилирование затрагивает только топогеодезические работы и смоточно-размоточные операции и не превышает в целом 30-35%. Тогда как столь значительный прирост геолого-геофизической информативности при использовании стандартной методики 2D просто недостижим.

Альтернативным подходом к дальнейшему выполнению сейсморазведочных работ с применением ШП является комбинирование ШП и классического 2D-профилирования. В этом случае в пределах изучаемой площади должны быть выбраны несколько ключевых траекторий для создания по ним каркасной сети широких профилей, а остальные профили отрабатываются в варианте 2D. Опыт таких работ уже имеется [9], что подтверждает практическую реализуемость и перспективность данного подхода.

Таким образом, более широкое применение системы наблюдения ШП на региональном этапе ГРП является перспективным направлением в условиях постоянно увеличивающихся требований к качеству и геологической информативности результатов сейсмического метода. Предложенные направления дальнейшего развития технологии широкого профиля – модификация системы наблюдения и комбинирование профи-

лей ШП с классическим 2D профилированием удовлетворяют этим требованиям, сохраняя при этом экономическую эффективность работ.

Литература

1. Астраханский карбонатный массив: строение и нефтегазоносность / под ред. Ю.А. Воложа, В.С. Парасыны. – М. : Научный мир, 2008. – 300 с.
2. Будяк А. В. Современные задачи для системы наблюдения «широкий профиль» // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2023. – № 4. – С. 71–75.
3. Будяк А. В. Широкий профиль как рациональный компромисс между 2D и 3D на малых объектах // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2026. – №2. – С. 60 – 66.
4. Веденяпин О.А., Каплан С.А., Лебедев Е.Б., Левченко Т.В., Рок В.Е., Левченко В.Д., Перепелкина А.Ю. Моделирование систем наблюдения широкого профиля в условиях солянокупольной тектоники // Прикладная геофизика. – 2018. – № 5. – С. 45–53.
5. Глоговский В.М., Мешбей В.И., Цейтлин М.И., Лангман С.Л. Кинематико-динамическое преобразование сейсмической записи для определения скоростного и глубинного строения среды // Сборник докладов второго научного семинара стран – членов СЭВ по нефтяной геофизике. – Т. 1: Сейсморазведка. – М. : СЭВ, 1982. – С. 327–331.
6. Днистрянский В.И., Побережский С.М., Гореликов В.И. Методика и технология полевых сейсморазведочных работ при региональных исследованиях // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 22–28.
7. Лангман С.Л., Силаенков О.А. Кинематико-динамическое преобразование – инструмент параметризации волнового поля // Геомодель-2011 : сборник материалов 13-й Международной научно-практической конференции по проблемам комплексной интерпрета-

ции геолого-геофизических данных при геологическом моделировании месторождений углеводородов. – Геленджик, 2011. – С. 215–219.

8. Парамонов В.К., Калинин А.Ю., Черваков В.М., Гореликов В.И., Карнаухов В.И. Широкопрофильная сейсморазведка МОВ-ОСТ: методика и результаты // Технологии сейсморазведки. – 2006. – № 3. – С. 5–12.

9. Фортунатова Н.К., Канев А.С., Баранова А.В., Белоусов Г.А., Володина А.Г. Особенности геологического строения и перспективы нефтеносности отложений доманикового типа в пределах южной части Актаныш-Чишминского палеопрогиба (Благовещенская впадина и Южно-Татарский свод) // Геология нефти и газа. – 2023. – № 4. – С. 85–103.

Подробнее об авторах



Шушкевич Н.Ю.
вед. инженер сектора
комплексной обработки
сейсмических и сква-
жинных данных ФГБУ
ВНИГНИ



Гоц И.А.
зав. отделением геофи-
зических исследований
ФГБУ ВНИГНИ



Каплан С.А.
к.т.н., зав. отделом мето-
дического сопровожде-
ния обработки данных
сейсморазведки и каро-
тажа ФГБУ ВНИГНИ



Лебедев Е.Б.
зав. сектором комплекс-
ной обработки сейсмиче-
ских и скважинных дан-
ных ФГБУ ВНИГНИ



Силаенков О.А.
главный геофизик
ООО "Сейсмотек"