

ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ. II. ПОСТРОЕНИЕ СЕРИИ ГОДОГРАФОВ ВОЛН, ОТРАЖЁННЫХ ОТ ГРАНИЦ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

Е.В. Рабинович

д-р. техн. наук, профессор, e-mail: rabinovich@corp.nstu.ru

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация. В целях построения сейсмических изображений высокого разрешения и точности предлагается оригинальная технология сейсмической локации. Излагается вторая часть технологии. Показано применение идей радиолокационных методов со сверхразрешением для построения с высоким разрешением и точностью серии годографов отражённых от границ сейсмического разреза волн. Серия строится при неизменном положении источника колебаний. Технология обладает возможностью автоматической обработки как рутинных задач построения годографа волны, отражённой от прямолинейной границы, так и нестандартных задач, связанных с изменением конфигурации границы или её разрывным нарушением.

Ключевые слова: сейсмическая цифровая антенная решётка, сверхразрешение, локационный рельеф, серия годографов волн.

Введение

Серия годографов отражённых волн является важнейшим кинематическим атрибутом геометрической сейсмологии, который используется для поиска границ и расчёта элементов залегания исследуемой среды.

Серия годографов отображает на плоскости с координатами время – удаление сейсмического изображения отражающих границ глубинно-скоростной модели среды. Это изображение содержит основные исходные данные для интерпретации результатов сейсморазведки. Качество интерпретации результатов сейсморазведочных работ напрямую зависит от точности построения изображения и его разрешающей способности. Разрешающую способность изображения отражающих границ определяет соответствующее количество выявленных годографов серии.

Согласно широко используемой глубинно-скоростной модели геологической среды, форма годографа отражённой от плоской границы раздела волны представляет собой гиперболу. Фазовым годографом отражённой волны называется зависимость времени распространения какой-либо определённой особенности (фазы) сейсмического импульса (СИ) отражения; его вступления, экстремума или центра от расстояния между пунктами возбуждения и приёма колебаний.

Традиционные подходы к построению сейсмических изображений в виде серии годографов имеют ряд факторов неопределённости в вычислении формы годографов целевых волн.

Для самых простых глубинно-скоростных моделей отражающих границ известны аналитические выражения для формы годографов. Для других моделей эти выражения имеют различные приближенные представления.

Границы слоев глубинно-скоростной модели среды выявляются в результате прослеживания и корреляции на исходных сейсмограммах интенсивных и протяжённых осей синфазности целевых волн. Обычно оси синфазности выявляются по первым вступлениям (началам) СИ отражений.

Выявление осей синфазности целевых волн позволяет оценить времена их прихода, т. е. аппроксимировать годографы этих волн. Однако эта аппроксимация полученных годографов характеризуется неопределённостью, связанной с трудностью выявления первых вступлений СИ в условиях помех и шумов микросейсмической обстановки при регистрации сейсмических сигналов. Присутствие на сейсмограммах нецелевых волн, неоднородность среды в зоне малых скоростей и в верхней части разреза также увеличивают неопределённость прослеживания осей синфазности.

Процедура выявления осей синфазности целевых волн имеет устойчивое решение только в рамках самой простой горизонтально-слоистой модели среды при постоянной скорости распространения волн и их зеркальном отражении от границ слоев. Полученный по серии годографов временной разрез обладает полным подобием по отношению к реальному глубинному разрезу. Однако уже при одной наклонной границе это подобие нарушается, и для получения правильного изображения отражающих границ временной разрез подвергается дополнительной обработке – миграции.

Для получения параметров горизонтальных отражающих границ осуществляется спрямление осей синфазности и компенсация нелинейности годографов. Оси спрямляются путём ввода в сейсмотрассы исходных сейсмограмм кинематических поправок – временных сдвигов, соответствующих временам распространения однократно отражённых волн. При этом точный расчёт кинематических поправок возможен только для известных структурных форм и скоростных параметров модели среды. Поэтому, в общем случае, расчёт и ввод кинематических поправок имеет итеративный (и субъективный) характер, он выполняется многократно, исходя из последующих результатов вычисления скорости распространения волн.

Таким образом, оценка временных и геометрических параметров глубинно-скоростной модели среды, основанная на субъективных упрощённых и приближенных данных о форме годографов, является недостаточно достоверной. Это негативно влияет на качество построения сейсмических изображений.

Представленная статья является второй в цикле статей, который знакомит читателей с оригинальной технологией сейсмической локации, предназначенной для построения сейсмических изображений высокого разрешения и точности.

С этой целью в статье используется обращение к успешно развитым в теории и практике радиолокации сверхразрешающим методам локации, основанным на применении цифровых антенных решёток (ЦАР).

Материал данной статьи посвящён построению серии годографов отражённых волн с высоким разрешением и точностью.

В радио- и гидролокации, радиотехнических системах связи и других областях широко используются пассивные и активные многоканальные системы – ЦАР. На их базе реализованы различные алгоритмы локации, в том числе и со сверхразрешением, обеспечивающие тонкую адаптацию ЦАР к направлениям на источники импульсов отражения.

Диаграммы направленности ЦАР позволяют увеличивать отношение мощности полезного сигнала к средней мощности шума за счёт взвешенного суммирования принятых сигналов элементами решётки. Даже если в одном элементе решётки отношение сигнал/шум меньше нормы, на выходе ЦАР это отношение может быть значительно больше нормы. Шумы в элементах ЦАР предполагаются некоррелированными и равной мощности.

Название алгоритмов локации призвано подчеркнуть возможность сверхразрешающей оценки направлений приёма сигналов (пеленгов источников) при разносе последних по угловым координатам, меньшим релейского интервала разрешения [1].

Сверхразрешение пеленгов основано на построении пространственной критериальной функции (пеленгационного рельефа), заданной на множестве оценок пеленгов. Она определяется вектором задержек сигнала на элементах ЦАР и обратной корреляционной матрицей принятых сигналов. При помощи сканирования множества пеленгов вектором-гипотезой находят максимумы пеленгационного рельефа и их координаты. Последние дают оптимальные оценки пеленгов источников импульсов отражения.

Например, ЦАР, оптимизированная по критерию Кейпона [2], даёт оценку пеленга за счёт подавления любого сигнала, волновой фронт которого отличается от вектора-гипотезы.

Определение максимального значения пеленгационного рельефа позволяет ЦАР, при наличии одного источника, выбрать наилучшее направление на источник импульса отражения из сектора наблюдения вместо единственного направления при приёме сигнала обычным локатором [3]. В случае нескольких источников ЦАР осуществляет их пространственное разрешение, с максимальным подавлением шумов и помех, в том числе и взаимных.

Ряд актуальных задач сейсморазведки решается алгоритмами, использующими многоканальную обработку. Среди них качественное построение на сейсмограмме серий годографов отражённых волн и временных разрезов. Качество этих сейсмических изображений определяется точностью оценки такой информации, как расстояние до источника отражения СИ, время и скорость распространения волны в конкретном слое среды, наклон отражающей границы и др.

Дадим краткое описание отличий постановок радиолокационной и сейсмической задач.

В радиолокационной постановке фронт падающей волны считается плоским и направленным под определённым углом к раствору антенны. На сейсмограммах МОВ (метода отражённых волн) фронт целевой отражённой волны (годограф) является в точности или почти гиперболическим. В общем случае он направлен пер-

пендикулярно к раствору сейсмической ЦАР.

Обе задачи применяют узкополосные импульсы, характеризующиеся комплексными амплитудами $\dot{S}(t) = S(t - \tau_i)e^{i\Phi(t - \tau_i)}$, огибающие $S(t - \tau_i)$ и фазы $\Phi(t - \tau_i)$ которых являются взаимосвязанными и зависящими от номера i элемента ЦАР. Поэтому, строго говоря, в каждый момент времени значения комплексных амплитуд в различных элементах ЦАР отличаются друг от друга.

В радиолокационных системах задержка сигнала на элементе ЦАР складывается из максимальной задержки, пропорциональной общему числу её элементов, и задержек комплексной огибающей $S(t - \tau_i)$. Однако в радиолокации используются такие узкополосные сигналы, для которых $S(t - \tau_i)$ имеют практически одинаковое значение для всех элементов ЦАР, что обеспечивает постоянство задержки сигнала.

В сейсмических ЦАР сама антенна не вносит задержки, но требуется учитывать задержки прихода комплексной амплитуды сигнала на разные датчики.

В предлагаемой технологии в качестве огибающей СИ используется колоколообразный нуль-фазовый импульс $S(\frac{t-\tau}{T_0}) = \text{sech}(\frac{2\pi f(t-\tau)}{m})$ (см. первую статью цикла). Отнесение времени прихода СИ к аргументу центра его огибающей делает постоянной зависимость задержки этого времени от номера элемента ЦАР.

Поэтому задержка сигнала на элементе i сейсмической ЦАР зависит только от суммы общей задержки фронта и частной задержки τ_i .

Локационный рельеф по сравнению с радиолокационным обладает достоинством более точной оценки параметров искомым результатов. Для его вычисления используются более близкие (локальные) статистические связи сигналов, принятых различными элементами ЦАР, в узких областях сейсмограммы, отвечающих за годограф волны. В то время как для вычисления радиолокационного рельефа используется интегральная корреляция полных данных [2].

Применение сейсмической ЦАР, также как и радиолокационной [4–7] для оценки параметров полезного сигнала, увеличивает отношение его мощности к средней мощности шума, позволяет выявить на сейсмограмме трудноразличимые оси синфазности СИ.

Применение алгоритмов сейсмической локации со сверхразрешением позволяет с заданной точностью построить серии годографов отражённых волн, разделить близкие или интерферирующие фронты волн.

1. Теоретические материалы

При решении задачи, требующей высокоточной оценки параметров отражённых волн, рационально использовать успешный опыт сверхразрешающей радиолокации.

В предлагаемой технологии по мгновенным фазам каждого обнаруженного СИ выявляются и прослеживаются соответствующие оси синфазности гиперболической формы. Из полученной в узкой области сейсмограммы совокупности осей синфазности выбирается наилучшая, согласно сейсмическому критерию сверхразрешения, гипербола. Эта гипербола с заданной точностью отображает параметры согласованного со свойствами данного временного интервала сейсмограммы годографа отражённой волны.

Для построения таких годографов, как и в радиолокации, строится пространственная критериальная функция (локационный рельеф), определённая на множестве допустимых гипербол. Сейсмическая критериальная функция зависит от задержек сигнала на элементах сейсмической ЦАР и сумм амплитуд сейсмотрасс в точках их пересечения с каждой гиперболой.

Для поиска гиперболы, дающей наилучшую оценку параметров годографа, данной узкой области сейсмограммы выполняется сканирование множества допустимых гипербол вектором-гипотезой. Последний представляет собой комплект образцовых гипербол с параметрами, характеризующими удаление источника колебаний от сейсмоприёмника, время и скорость распространения волны до него. Оценка точности сканирования определяется заданными шагами дискретизации всех трёх параметров образцовых гипербол.

Результатом сканирования являются значения локационного рельефа для каждого элемента множества гипербол. Производится поиск набора максимумов локационного рельефа и соответствующей им серии гипербол, представляющих годографы отражённых волн.

Созданный в соответствии с таким подходом алгоритм локации обеспечивает заданную точность построения и пространственного разрешения серии годографов отражённых волн в каждой из набора выявленных узких областей сейсмограммы.

При неизменном положении источника сейсмических колебаний построенная на наборе узких областей сейсмограммы серия годографов отражённых волн характеризует совокупность слоев исследуемой среды.

Роль ЦАР в технологии выполняет эквидистантная линейная многоканальная цифровая сейсморегистрирующая станция [8].

Рассмотрим в условном масштабе схему (рис. 1) регистрации фронта волны, отражённой наклонной прямолинейной границей, приходящего на сейсмоприёмники – входные элементы сейсмической ЦАР.

В верхней части схемы на нулевом уровне изображена поверхность Земли, на которой в линию располагаются изображённые треугольниками сейсмоприёмники ЦАР. Каждому из них соответствует зарегистрированная сейсмотрасса. На каждой сейсмотрассе СИ изображены импульсами зелёного цвета, а импульсами синего цвета – огибающая СИ¹.

В центре расстановки расположен и звёздочкой изображён искусственный источник возбуждения сейсмических колебаний. Он совмещён с центральным имеющим сейсмотрассу под номером 0 сейсмоприёмником.

Красная гипербола изображает фронт отражённой волны, движущийся вверх в направлении перпендикулярном раствору ЦАР.

Вершина гиперболы располагается на сейсмотрассе с номером –3. Сдвиг номеров сейсмотрасс, соответствующих источнику колебаний и максимуму гиперболы, показывает наличие наклона прямолинейной границы, породившей волну отражения.

Горизонтальная касательная к вершине гиперболы характеризует одинаковую для каждого сейсмоприёмника часть времени распространения фронта до расста-

¹Цветные иллюстрации доступны на сайте журнала <http://msm.omsu.ru>

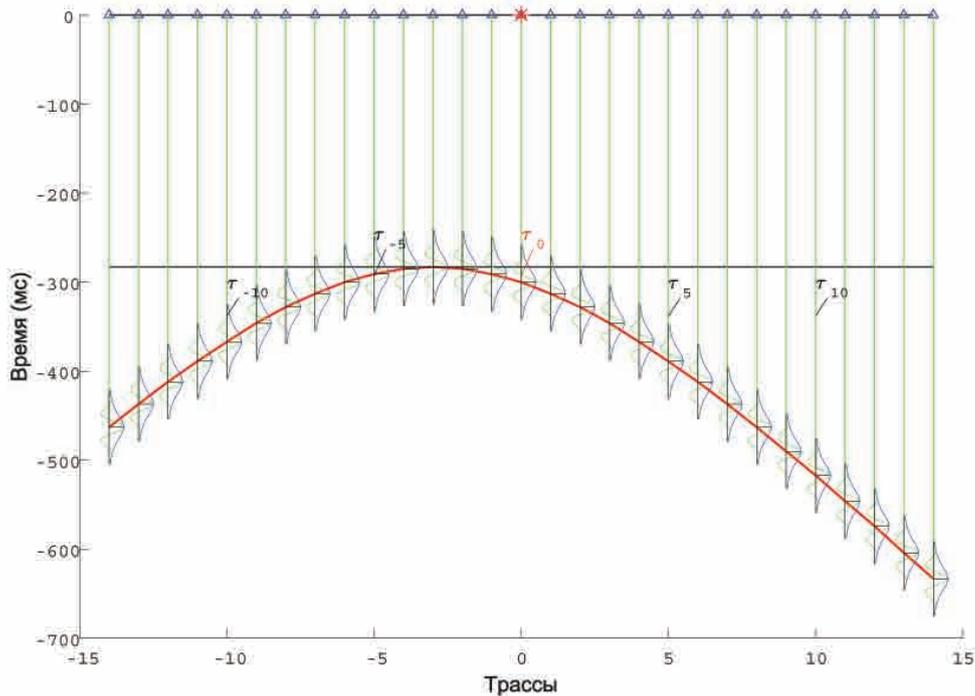


Рис. 1. Схема линейной сейсмической ЦАР и фронта падающей на неё отраженной волны

новки сейсмоприёмников – общую задержку фронта.

Ниже касательной на сеймотрассах до их пересечения с фронтом волны символом τ с индексом отмечены задержки прихода волны на каждый сейсмоприёмник. Задержки отсчитываются по сравнению с временем прихода на третий слева от источника колебаний сейсмоприёмник, соответствующий максимуму гиперболы.

2. Результаты практической реализации

Материал данной статьи использует рассмотренные в первой статье цикла обнаруженные СИ отражения и точные координаты их фазовых реперов (далее – реперов).

После того как найдены мгновенные фазы всех обнаруженных СИ на сейсмограмме, составляется её локационная карта.

Локационная карта сейсмограммы исходно представляет собой два множества реперов СИ красного и синего цвета, расположенных на последовательных трассах сейсмограммы. Цвет репера говорит о фазе СИ, которая может быть положительной (красный цвет) или отрицательной (синий цвет) в зависимости от значения амплитуды СИ. Одноцветные реперы поочередно соединены между собой линиями (путями) соответствующего цвета, позволяющими аппроксимацию фрагментом гиперболы. Такая карта необходима для выявления и прослеживания осей синфазности отражённых волн. Она полезна при построении годографов волн, отражённых как от

границ согласованного залегания пластов среды, так и от границ пластов с нарушенной согласованностью. В этих случаях могут наблюдаться разорванные годографы, представляющие собой куски гипербол, их пересечения и даже петли. Большинство этих паттернов находят отображение на локационной карте сейсмограммы.

Оси синфазности волны, отражённой от прямолинейной границы, представляют собой гиперболы, которые соединяют одноцветные реперы одного СИ, присутствующего на большинстве последовательно расположенных трассах сейсмограммы.

Выявление осей синфазности производится по обнаруженным на сейсмотрассах СИ и их реперам. Распространённый на практике факт частичного отсутствия данных о координатах реперов СИ на этих трассах вынуждает проводить обработку поэтапно и с дозированной степенью доверия. Сначала выявляются достоверные оси синфазности, основанные на полных данных, затем выявляются оси синфазности, основанные на данных, содержащих небольшие пропуски, а потом выполняется «виртуальное» выявление, использующее приемлемые отрывочные данные.

На каждой сеймотрассе вычисляется преобразование Гильберта, которое даёт расположение импульсов её огибающей (ИО).

В зависимости от характера изменения и значений амплитуды ИО производится разделение сеймотрассы на два типа «допустимости» массивов интервалов и реперов. Интервал и находящиеся в нем реперы называются «допустимые», если ИО имеет высокую амплитуду, называются «дополнительные», если ИО имеет меньшую, но достаточную для обработки амплитуду. Для допустимых интервалов производится проверка наличия в его пределах максимума квадратурной корреляции ρ сеймотрассы с импульсом хотя бы одной из найденных мгновенных частот (см. первую статью цикла). Если таковой не найден, то интервал и реперы переводятся в одноимённые дополнительные массивы.

В зависимости от характера изменения и значений амплитуды линейно-ломанной функции мгновенной фазы $\varphi(t)$ производится добавочное разделение реперов СИ. Если в допустимом интервале во временной координате репера значение ИО ниже, чем задано, то репер также переводится в массив дополнительных реперов.

При центральной расстановке приёмников сейсмограмма делится на сеймотрассы слева и справа от трассы источника колебаний. Каждая из этих частей делится на три зоны (ближняя, средняя и дальняя относительно источника колебаний) сеймотрасс.

Применяя ряд ограничений и проверок, выявляются пробные гиперболы, имеющие максимум на сеймотрассе источника колебаний и проходящие через три репера одного цвета, каждый из которых находится в своей зоне. Сверху и снизу от каждой полученной гиперболы проводятся на определённом (малом) удалении конгруэнтные гиперболы, образующие трубу соответствующего цвета.

В каждой трубе выбираются пары одноцветных реперов, лежащих на соседних сеймотрассах. Выполняется проверка заданных свойств пар и сортировка их в массивы допустимых и дополнительных пар реперов. На формировании этих массивов роль пробных гипербол и связанных с ними труб заканчивается.

Прослеживание от трассы к трассе осей синфазности каждой отражённой волны производится следующим поэтапным образом.

Расположенные на соседних трассах допустимые пары реперов одного цвета соединяются в линию, образующую «путь» соответствующего цвета. Проверяется правильность направления пути и производится устранение различных неоднозначностей и пересечений путей как одного, так и разных цветов.

Задействованные на этом этапе допустимые пары реперов образуют путь допустимого типа. Делается попытка формирования дополнительных путей из оставшихся допустимых и дополнительных пар реперов. Полученный на этом этапе путь становится путём дополнительного типа.

Далее производится увеличение длины дополнительных путей за счёт заполнения пропусков искусственно добавленными реперами или парами. Такой путь становится путём виртуального типа.

Полученные пути разных цветов и типов заносятся в локационную карту сейсмограммы. В данной статье локационная карта используется только для построения простейших годографов волн отражения от прямолинейных границ.

Дальнейшая обработка начинается с пути максимальной длины. Значения максимальной и минимальной длин пути выбираются в зависимости от вида конкретной сейсмограммы.

В одной из частей сейсмограммы, где находится максимальный путь, последовательно по убыванию длины пути каждого цвета и типа, рассчитываются предварительные гиперболы. Каждая из этих гипербол симметрична относительно сейсмотрассы источника колебаний и с высокой точностью аппроксимирует очередную путь. Вокруг полученной гиперболы строится труба заданного диаметра. Пары реперов, попавшие в трубу и составляющие пути одного цвета и типа из этой части сейсмограммы, участвуют с аналогичными парами реперов из другой части в построении одной новой симметричной гиперболы. Эта гипербола становится осью синфазности волны отражения от горизонтальной прямолинейной границы.

По исчерпанию длинных путей, согласованных в обеих частях сейсмограммы, процесс прослеживания осей синфазности завершается.

Рисунок 2 показывает, что одному СИ соответствуют несколько чередующихся осей синфазности красного и синего цвета, характеризующих его противоположные мгновенные фазы. Однако сейсмограмма содержит и отдельные, и не чередующиеся оси синфазности.

В зависимости от числа допустимых и дополнительных пар реперов, типа путей, участвующих в построении оси синфазности каждого цвета, выставляется трёхбалльная оценка «доверия» к данной гиперболе. На рисунке 2 оси, обладающие высшей оценкой «доверия» (более 94 % допустимых пар реперов), обозначаются сплошными линиями, средней (85 %–94 % допустимых пар реперов) – пунктирными линиями и низкой (62 %–85 % допустимых пар реперов) – линиями, состоящими из точек [9].

Для точной оценки времени пробега волны требуется выбрать только одну ось синфазности, представляющую годограф отражённой волны. При этом необходимо учесть все использованные реперы СИ, аргумент максимума ИО, принять в учёт возможные искажения записи трассы из-за шумов и помех.

Здесь в дело вступает алгоритм поиска наилучшей гиперболы, с заданной точностью отображающей параметры годографа, согласованного с реальными трассами

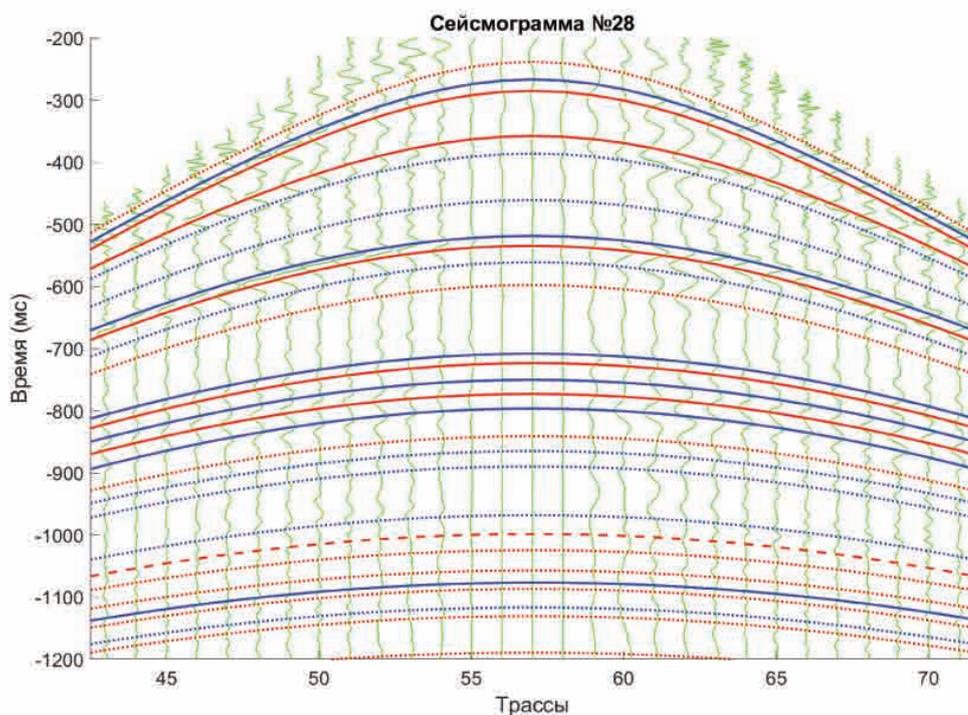


Рис. 2. Фрагмент сейсмограммы № 28 с осями синфазности

соответствующей узкой области сейсмограммы.

Полученные оси синфазности разбивают сейсмограмму уже не на узкие области, а на временные локационные интервалы, с точно очерченными границами. В каждом из интервалов производится построение красного и синего локационных рельефов, условно изображённых на сеймотрассе источника колебаний (рис. 3).

Сейсмическая ЦАР последовательно фокусируется на горизонтальные узлы сетки локации.

На каждой верхней границе локационного интервала определяется узел с начальным временем и скоростью распространения отражённой волны. Начиная с этих узлов, с шагом по времени 1 мс, по скорости 20 м/с и по удалению от источника колебаний 25 м в диапазоне -50 – 50 м, и до конца интервала формируются «веера» полос – гипербола с трубами заданного диаметра. Сдвиги вееров по удалению необходимы для установления величины угла наклона прямолинейной отражающей границы к горизонту.

Вычисляется значение локационного рельефа красного цвета для каждого луча. Это значение пропорционально произведению числа допустимых пар реперов красного цвета, попавших в трубу, на сумму значений амплитуд сеймотрасс в момент времени пересечения с лучом. Учитывается значение оценки «доверия» гиперболы луча.

Аналогично вычисляется значение локационного рельефа синего цвета. Вычисляется значение рельефа чёрного цвета, которое равно сумме амплитуд ИО сей-

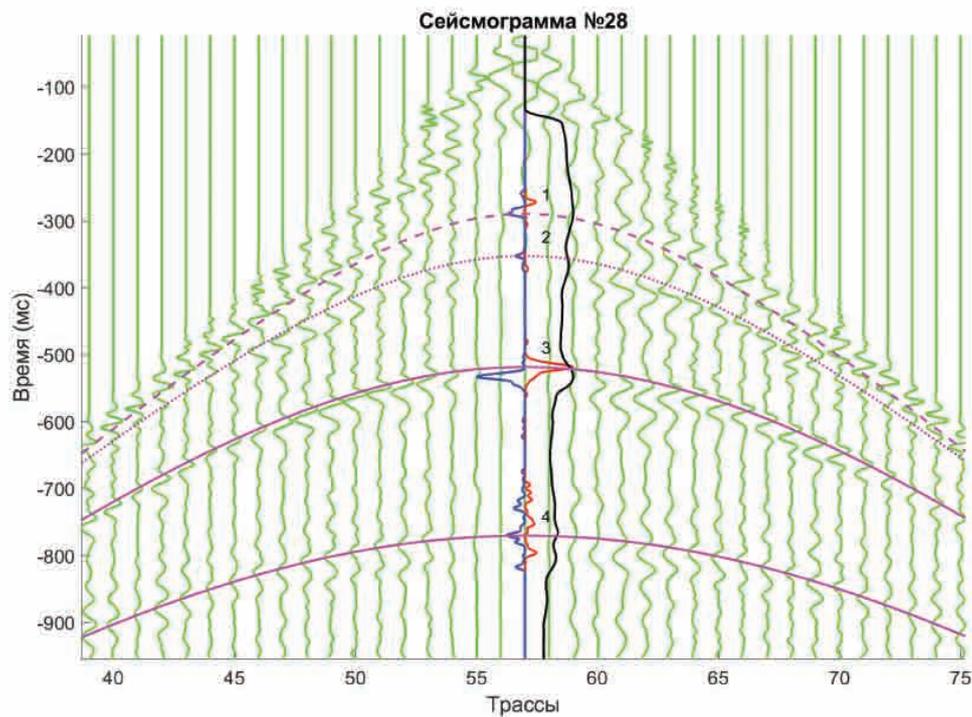


Рис. 3. Локационные рельефы и соответствующие годографы

смотрасс для конкретного момента времени.

Для каждого максимума чёрного рельефа ищутся ближайшие максимумы на красном и синем рельефах. Большой максимум определяет окончательный выбор локационного рельефа в данном локационном интервале сейсмограммы. Соответствующая окончательному локационному рельефу гипербола выбирается в качестве годографа отражённой волны от прямолинейной границы.

Следует отметить, что построение локационного рельефа в некоторой степени заменяет ввод кинематических поправок при традиционной интерпретации данных сейсморазведки МОВ.

Поправки вводятся с целью преобразования криволинейного годографа волны, отражённой от плоской границы, в прямолинейный годограф нормальных времён – линию $t_0(x)$. Эта линия отображает форму соответствующего участка отражающей границы: нормальные времена пропорциональны глубине границы. Линии $t_0(x)$ однократных отражений образуют сейсмическое изображение – кинематический временной разрез.

При этом точный расчёт кинематических поправок возможен только для известных структурных форм и скоростных параметров модели среды. В общем случае расчёт и ввод кинематических поправок имеет итеративный (и субъективный) характер, он выполняется многократно, исходя из последующих результатов вычисления скорости распространения волн.

Совокупность отрезков прямых, проведённых через значения аргументов мак-

симумов локационного рельефа, представляют собой сейсмическое изображение – локационный кинематический временной разрез. Единственное отличие последнего от традиционного заключается в том, что при его построении использованы значения всех времён максимумов годографов, отвечающих за оценку углов наклона прямолинейной отражающей границы. Притом, что значения $t_0(x)$, характеризуют значения только нулевого наклона. Следует отметить, что разница в этих временах в масштабе всего разреза незначительна.

На рисунке 4 изображён локационный временной разрез, построенный по 10 сейсмограммам.

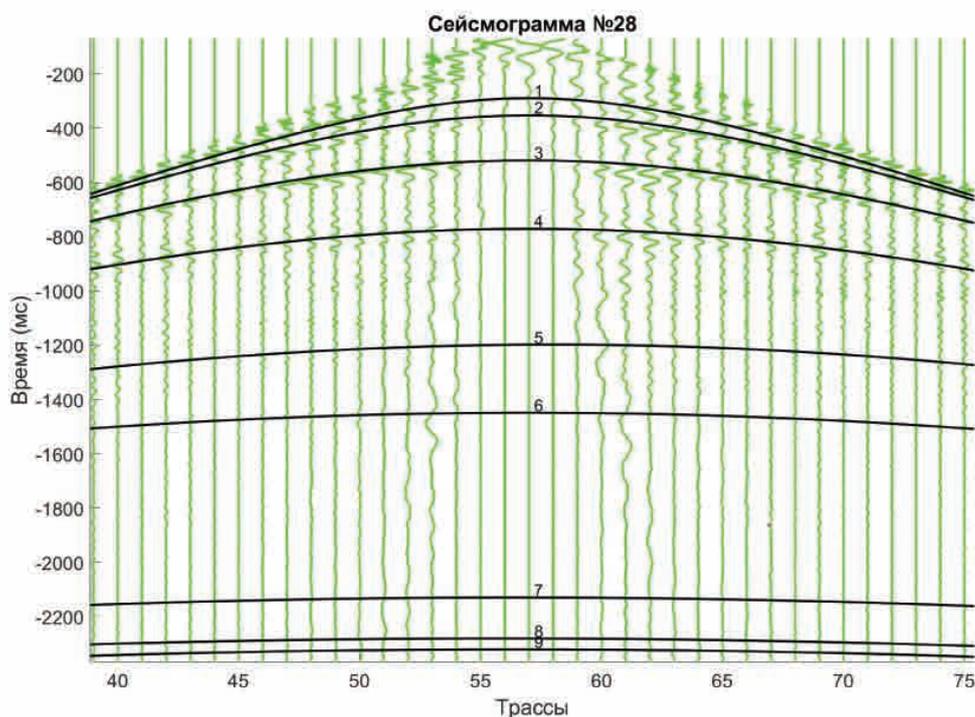


Рис. 4. Локационный временной разрез

Локационный рельеф позволяет выделить и проследить даже малозаметные систематические колебания на сейсмограмме, увеличивая тем самым точность построения и степень разрешения годографов разных волн.

Для примера построения годографов согласно предложенной технологии приведён (рис. 5) фрагмент сейсмограммы достаточно низкого качества, содержащей вдобавок пропуски данных из-за избыточного подавления низкоскоростной помехи. На рисунке 5 не изображены куски гипербол и множество реперов, не использованных при построении этих кривых.

Фрагмент содержит не только годографы, основанные на гиперболах, построенных на полных данных, но и на данных с пропусками и даже виртуальных данных. Возможность построения достаточно большого количества, пусть не вполне достоверных годографов, обеспечивает повышение разрешающей способности получен-

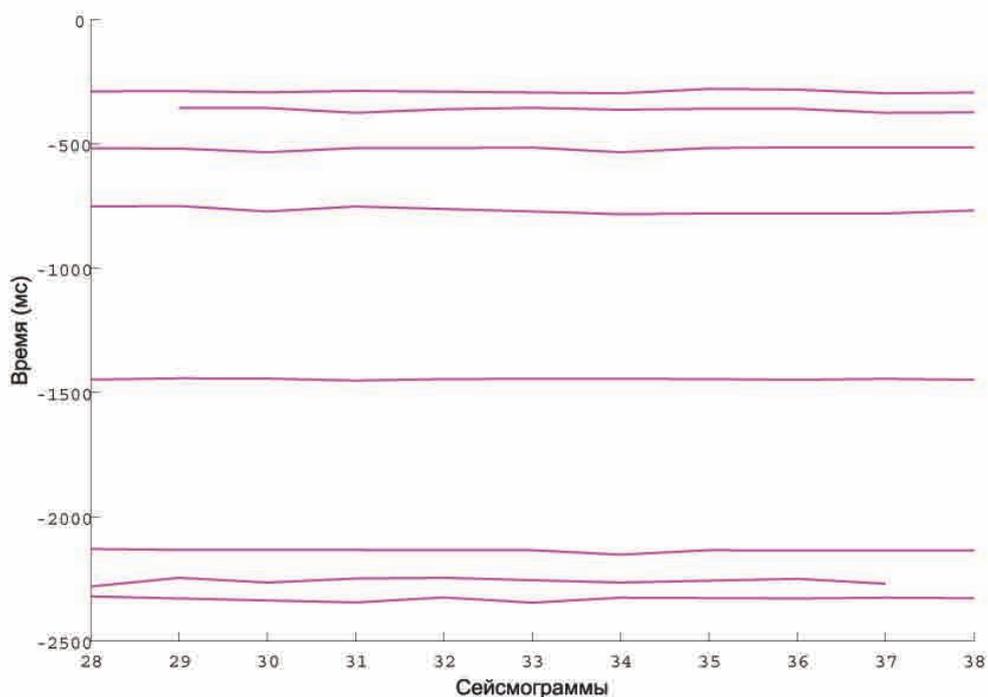


Рис. 5. Фрагмент сейсмограммы № 28 с серией годографов отражённых волн

ного сейсмического изображения. Естественно, все найденные годографы имеют в протоколе обработки сейсмограммы отметки о степени «доверия» к ним.

При обработке сейсмограмм МОВ вручную или полуавтоматически выделяют только сейсмические волны с чётко выраженными индивидуальными свойствами при одновременном выполнении нескольких условий. Среди этих условий наличие в группе колебаний различных СИ со сходной формой профиля, с временами регистрации, меняющимися от трассы к трассе плавно и закономерно и др. Очевидно, что основанное на этих условиях визуальное выделение и прослеживание осей синфазности является субъективным и недостаточно достоверным.

Исходя из содержимого локационной карты сейсмограммы, составленной по координатам мгновенных фаз СИ (см. первую статью цикла), можно найти значительно больше объективно присутствующих на сейсмограмме осей синфазности, а также их нарушений.

Технология обеспечивает возможность автоматического выявления и прослеживания осей синфазности и годографов отражений как от границ согласованного залегания пластов среды, так и от границ пластов с нарушенной согласованностью. Возможно также выявление годографов, соответствующих нарушениям сплошности пласта, антиклинальным, синклинальным и разрывным нарушениям, а также диапировым структурам (соляным столбам).

Для этой цели служит локационная карта сейсмограммы и подготовленный заранее пополняемый набор паттернов годографов, соответствующих нарушениям. Как

правило, они представляют собой специфический комплект фрагментов гипербол.

После учёта найденной серии годографов волн, отражённых от прямолинейных границ, по дополнительной информации, хранимой в локационной карте, на сейсмограмме осуществляется автоматический поиск паттернов нарушений. При их выявлении начальная серия дополняется найденными годографами.

Качество локации координат реперов зависит от значений целого ряда параметров процедуры обработки, учитывающей всё разнообразие свойств полевых данных. Шумы, естественные и искусственные помехи искажают локационные рельефы сейсмограммы, поэтому окончательное построение годографов отражённых волн должно осуществляться с учётом информации, полученной от набора различных сейсмограмм системы наблюдений.

Например, с целью улучшения разрешения годографов, при наличии интерференции в локационном интервале одной сейсмограммы, необходимо сопоставить её локационный рельеф с рельефами сейсмограмм, зарегистрированных справа и слева.

На рисунке 6 приведены фрагменты трёх соседних сейсмограмм, изображающие локационные рельефы и построенные по ним оси синфазности одного СИ. Все три оси показывают наличие на профиле наблюдения фронта одной волны.

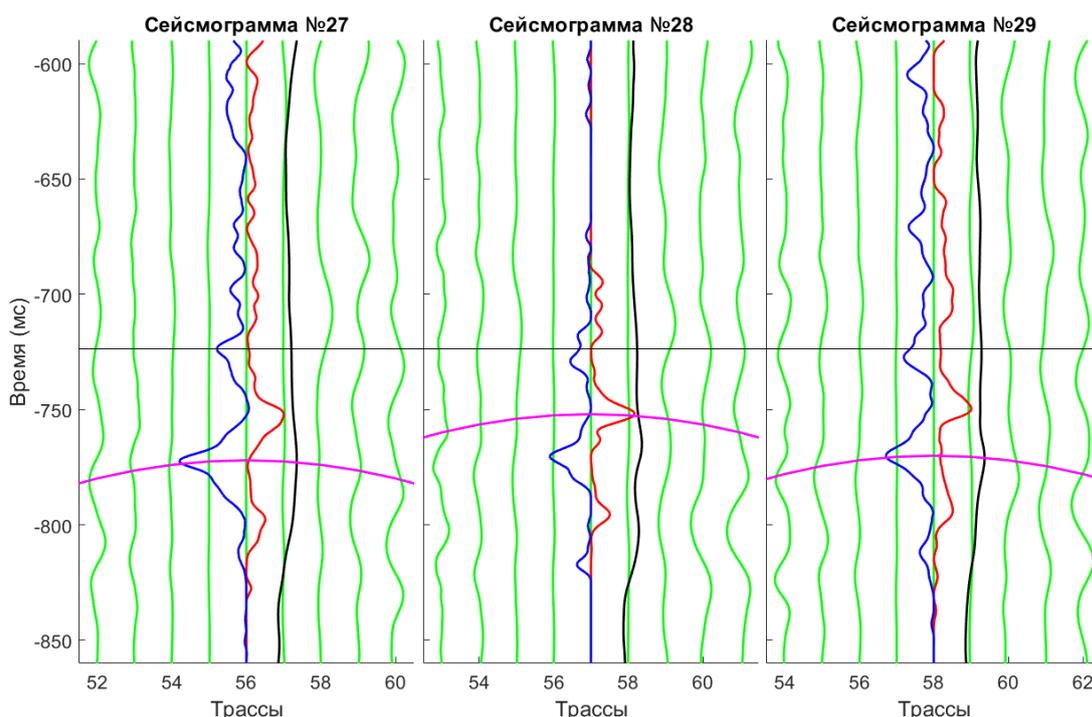


Рис. 6. Сравнение локационных рельефов трёх сейсмограмм

Искусственно проведённая чёрная линия призвана обратить внимание на то, что значения локационных рельефов на времени ~ 730 мс отображают наличие дополнительной синей оси синфазности, являющейся фазой упомянутого СИ.

Видно, что на сейсмограмме № 28 синий локационный рельеф в месте пересечения с чёрной линией имеет колебательный вид, определяемый интерференцией волн. Наличие в этом времени оси синфазности отметить невозможно. Красный рельеф на той же сейсмограмме подтверждает это наблюдение. С другой стороны, в этой узкой области на сейсмограммах № 27 и № 29 синие рельефы имеют вид однополярных импульсов, сигнализирующих о наличии синих осей синфазности.

Можно сделать вывод, что соответствующие локационные рельефы боковых сейсмограмм позволяют выявить интерференционные нарушения рельефа центральной сейсмограммы. Не важно, что в данном случае интерференции подверглась и оказалась пропущенной не основная ось синфазности. Важно, что есть возможность обнаружить годограф, пропущенный из-за интерференции. На использованных сейсмограммах такого примера найти не удалось.

Таким образом, можно заключить, что использование локационных рельефов даёт различные возможности повышения разрешающей способности сейсмического изображения в виде серии годографов, полученной по сейсмограмме и уточнённой по совокупности сейсмограмм профиля наблюдений.

3. Заключение

В работе показано, что применение методов радиолокации позволяет по-новому решать актуальные задачи построения сейсмических изображений.

Предложенная технология сейсмической локации обеспечивает возможность построения серии годографов волн, отражённых как от прямолинейных границ, так и от сложно устроенных границ, соответствующих нарушениям регулярного залегания пластов среды.

Технология осуществляет достоверную локацию фаз каждого обнаруженного СИ, что повышает точность автоматического выявления и прослеживания даже слабозаметных осей синфазности. Выбор наилучшей из этих осей обеспечивает построение годографов отражённых волн с высоким разрешением.

Полученное высокое разрешение сейсмического изображения в виде серии годографов делает более точным построение изображения глубинно-скоростной сейсмической модели среды. Такие изображения обеспечивают детальное выявление глубинной структуры земной среды, фиксируя местоположение даже близкорасположенных отражающих горизонтов.

Построению таких изображений посвящена следующая статья цикла.

Литература

1. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решётках. М. : Радио и связь, 2003. 200 с.
2. Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis // Proc. IEEE. 1969. V. 57, No. 8. P. 1408–1418.
3. Malyshkin G.S. et al. Optimal and Adaptive Methods of Processing Hydroacoustic Signals (Review) // Acoustical Physics. 2014. V. 60, No. 5. P. 570–587.

4. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М. : Радио и связь, 1981. 416 с.
5. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1989. 440 с.
6. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решёткой. Н. Новгород : ННГУ, 2007. 98 с.
7. Турчин В.И. Введение в современную теорию оценки параметров сигналов. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2005. 116 с.
8. Рабинович Е.В., Туркин А.С., Новаковский Ю.Л. Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта // Доклады ТУСУР. 2012. № 1(25). Ч. 1. С. 104–112.
9. Rabinovich E.V., Turkin A.S., Shefel G.S. The Phase Location of Reflected Seismic Pulses // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). IEEE. 2022. P. 1650–1654.

**SEISMIC LOCATION TECHNOLOGY. THE CONSTRUCTION OF A SERIES
OF HODOGRAPHS REFLECTED FROM THE BOUNDARIES OF THE SEISMIC
CROSS-SECTION OF WAVES**

E.V. Rabinovich

Dr.Sc. (Techn.), Professor, e-mail: rabinovich@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. An original technology for construction of seismic images of high-resolution and accuracy is proposed. In given article the second part of technology is stated. It shows the application of super-resolution radar methods ideas to construct a series of hodographs reflected from the boundaries of a seismic cross-section of waves. The series is built with high resolution and accuracy with a constant position of the wave source. The technology has the ability to automatically process both routine tasks of constructing a hodograph of a wave reflected from a rectilinear boundary, and non-standard tasks associated with changing the configuration of the boundary or its discontinuous violation.

Keywords: seismic digital antenna array, super-resolution, location relief, series of wave hodographs.

Дата поступления в редакцию: 17.05.2023