

ВЕКТОРНАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ
МЕТОДАМИ ВОЛНОВОГО ОБРАЩЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИВ. М. Агафонов¹ , А. С. Бугаев², Г. Н. Ерохин^{*,3}  и А. Л. Ронжин⁴ ¹ООО «Р-Сенсор», г. Долгопрудный, Россия²Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва, Россия³Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия⁴Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, г. Санкт-Петербург, Россия* **Контакт:** Г. Н. Ерохин, gerokhin@kantiana.ru

В работе анализируется декомпозиция исходных сейсмических данных методами волнового обращения во времени для построения сейсмических атрибутов. В рамках формального подхода к декомпозиции, как к отображению данных одного пространства в данные пространства большей размерности, дается классификация существующих методов сейсморазведки. Выделение этапа декомпозиции в обработке сейсмических данных позволяет упорядочить существующие направления исследований в этой области сейсморазведки и оценить перспективы. Подробно анализируется векторная декомпозиция, являющаяся основой нового метода сейсмической обработки данных Reverse Time Holography (RTH). Метод RTH включает, как частный случай, метод глубинной миграции, метод анализа амплитуд отражения от удалений, метод акустической инверсии и является альтернативой методу оценки скоростей на основе миграции и методу полного волнового обращения. Отмечена тесная связь техники обращения волнового фронта во времени в сейсморазведке с аналогичным обращением в оптике и акустике. Многообразие глубинных сейсмических атрибутов, получаемых в методе RTH на основе векторной декомпозиции, позволяет решать широкий круг практических задач поиска и разработки месторождений углеводородов на новом качественном уровне. Метод RTH успешно опробован на 21 месторождении углеводородов в различных нефтегазоносных провинциях РФ.

Ключевые слова: Сейсморазведка, обращение во времени, рассеяние, сейсмические атрибуты, декомпозиция

Цитирование: Агафонов, В. М., А. С. Бугаев, Г. Н. Ерохин и А. Л. Ронжин (2023), Векторная декомпозиция сейсмических данных методами волнового обращения во времени, *Russ. J. Earth. Sci.*, 23, ES3010, <https://doi.org/10.2205/2023es000837>

1. Введение

Вопросы декомпозиции сейсмических данных, то есть перевода из одного вида данных в другой, как минимум эквивалентный, а чаще всего и в данные с расширенными параметрами, представляет собой ключевой момент в обработке сейсмической информации. Особую актуальность эта процедура приобрела с появлением методов декомпозиции общей точки изображения (Common Image Gathers – CIG) [Mosher u Foster, 2000; Rosales u Biondi, 2005]. Исследование угловых зависимостей рассеяния и анализ поведения векторов нормали к волновым фронтам является предметом сейсмических технологий, основанных на угловых сейсмограммах общей точки изображения – Angle Domain CIG [Xie u Wu, 2002]. Такие векторно-ориентированные сейсмические методы обработки данных можно кратко охарактеризовать как методы векторной сейсморазведки (vector-based seismic) [Yoon u Marfurt, 2006]. Важное место в этом ряду занимают технологии декомпозиции, основанные на обращении волнового фронта

Получено: 5 ноября 2022 г.

Принято: 23 января 2023 г.

Опубликовано: 11 сентября 2023 г.



© 2023. Коллектив авторов.

во времени [Baysal *u др.*, 1983; McMechan, 1983; Wang *u McMechan*, 2015; Whitmore, 1983]. Математически такое обращение основано на решении сопряженных постановок и на анализе векторных характеристик двух волновых полей: опорного волнового поля и обращенного во времени волнового поля. Оказалось, что в векторной сейсморазведке, к которой относится также и новый метод обработки сейсмических данных Reverse Time Holography (RTH), весь процесс обработки данных удобно разделить на два этапа: этап подготовки исходных данных – или этап декомпозиции данных, и этап оценки сейсмических атрибутов – или этап синтеза атрибутов [Erokhin, 2019; Erokhin *u др.*, 2017]. В данной статье анализируются современные подходы в области первого этапа обработки данных – декомпозиции. Используется единый подход в анализе формально-го отображения исходных сейсмических данных в некоторые более информативные расширенные пространства данных, что позволяет упорядочить существующие направления исследований в этой области сейсморазведки и оценить перспективы. Приведены примеры обработки сейсмических данных на основе детального анализа поведения во времени векторных волновых полей в новом методе RTH.

2. Волновое обращение и декомпозиция данных

Математически, обращение волны во времени тесно связано с сопряженными уравнениями, возникающими при интегрировании по частям в некоторых гильбертовых пространствах [Anikonov *u др.*, 1997]. Действительно, техника интегрирования по частям лежит в основе важнейших математических подходов, таких как определение сопряженных операторов Лагранжа, формулы Байеса, постановок сопряженных задач для дифференциальных уравнений и т. д. Как оказалось, в физике сопряженные процессы также лежат в основе ряда известных физических явлений, реализованных в практические технологии, такие как технология «обращающего во времени зеркала» для лазерного луча [Zel'dovich *u др.*, 1972], технология акустического воздействия в медицине [Fink, 1997] и пр. В методе полноволновой инверсии FWI (Full Wave Inversion) сопряженная математическая формулировка используется для вычисления производной Фреше при минимизации функционала невязки [Plessix, 2006; Tarantola, 1984; Virieux *u Operto*, 2009]. В работе [Aleksseev *u Erokhin*, 1989] впервые была отмечена тесная связь между сущностью предложенного авторами решения задачи интегральной геофизики SJI (Simultaneous Joint Inversion), обобщающего подход FWI на случай многодисциплинарности, и сущностью обращения во времени лазерного луча на основе «обращающего во времени зеркала». В этой же работе конструктивно доказана сходимость оптимизационного решения набора задач, основанных на сопряженных уравнениях математической геофизики на некотором слабо компактном множестве, и повышение устойчивости решения на нем в случае комплексирования методов различной физической природы.

Исследования по декомпозиции данных с последующей их фильтрацией тесно связаны с работами в области сейсмического рассеяния, которые широко проводились в последние почти 40 лет в связи с построением методов разделения отраженной и дифракционной компонент волнового поля [Khaidukov *u др.*, 2004; Kremlev *u др.*, 2011; Landa *u др.*, 1987; Moser *u Howard*, 2008; Popovici *u др.*, 2015; Zhu *u Wu*, 2008]. Дифракционное рассеяние в сейсмике чаще всего связывается с нетрадиционными трещинно-кавернозными коллекторами нефти и газа.

В сейсморазведке сопряженные формулировки для волнового уравнения лежат в основе известного метода Reverse Time Migration – RTM [Baysal *u др.*, 1983; McMechan, 1983; Whitmore, 1983]. Математическая постановка прямой задачи в нем имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c^2(x)} p_{tt}^f - \Delta p^f &= r(t) \delta(x - x_s), (x, t) \in \mathbb{R}^n \times (0, T), n = 2, 3 \\ p^f|_{t=0} &= 0, p_t^f|_{t=0} = 0, \\ x_s \in \Gamma &= \{x \in \mathbb{R}^n | x^n = 0, n = 2, 3\}, \\ p_0(x, t; x_s) &= p^f(x, t; x_s), (x, t) \subset \Gamma \times [0, T]. \end{aligned} \quad (1)$$

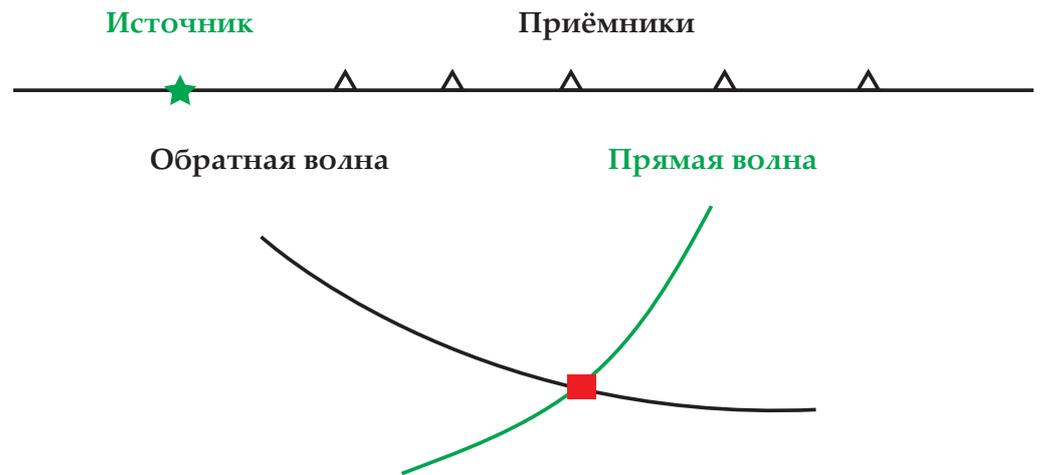


Рис. 1. Схема расчета в общей точке изображения по RTM.

Здесь $p^f(x, t; x_s)$ – давление, $r(t)\delta(x - x_s)$ – источник, сосредоточенный на границе в точке $x_s \in \Gamma = \{x \in \mathbb{R}^n | x^n = 0, n = 2, 3\}$, δ – функция Дирака, $r(t)$ – некоторая функция источника, T – время наблюдения.

Пусть $p_0 = p^f|_{\Gamma \times [0, T]}$ – измеренное на поверхности давление, $c = c(x)$ – известная скорость среды. Тогда сопряженная к (1) постановка в обратном времени имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c^2(x)} p_{tt}^b - \Delta p^b &= \delta_{\Gamma} p_0(x, t; x_s), (x, t) \in \mathbb{R}^n \times (0, T), n = 2, 3 \\ p^b|_{t=T} &= 0, p_t^b|_{t=T} = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь $p^f(x, t; x_s)$ – давление в обращенном времени.

На рис. 1 схематически представлено поведение решений (1) и (2) в окрестности некоторой точки среды.

Иными словами, решение уравнений (1)–(2) отображает исходный набор данных, полученный, например, системой сбора CDP 3D вида:

$$A(p, x_r, t, x_s) \subset R^6, \tag{3}$$

где $p \in R^1, t \in R^1, x_r \in R^2, x_s \in R^2$ в некоторый расширенный набор данных:

$$G(p^f, p^b, x, t, x_s) \subset R^8, \tag{4}$$

где $p^f \in R^1, p^b \in R^1, t \in R^1, x \in R^3, x_s \in R^2$.

Решение задач (1) и (2) в постановке RTM можно кратко записать как действие некоторого оператора D , который осуществляет такую декомпозицию:

$$D : A \Rightarrow G. \tag{5}$$

Дальнейшее развитие метода RTM в подходах Angle Domain Common Image Gathers (ADCIG) RTM привело к использованию, наряду с давлениями, также и угла между падающим и рассеянным волновым полем $\gamma = (\alpha - \beta)/2$, где α – угол падения волны, β – угол рассеяния. Углы рассчитываются с использованием, например, векторов Умова–Пойнтинга [Alkhalifah, 2015; Yoon u Marfurt, 2006] которые усредняются по времени. В этом случае оператор D вида (5) осуществляет декомпозицию и отображает исходные стандартные данные (3) в данные из пространства еще большей размерности, чем (4):

$$G(p^f, p^b, \gamma, x, t, x_s) \subset R^9, \tag{6}$$

где $\gamma \in R^1$.

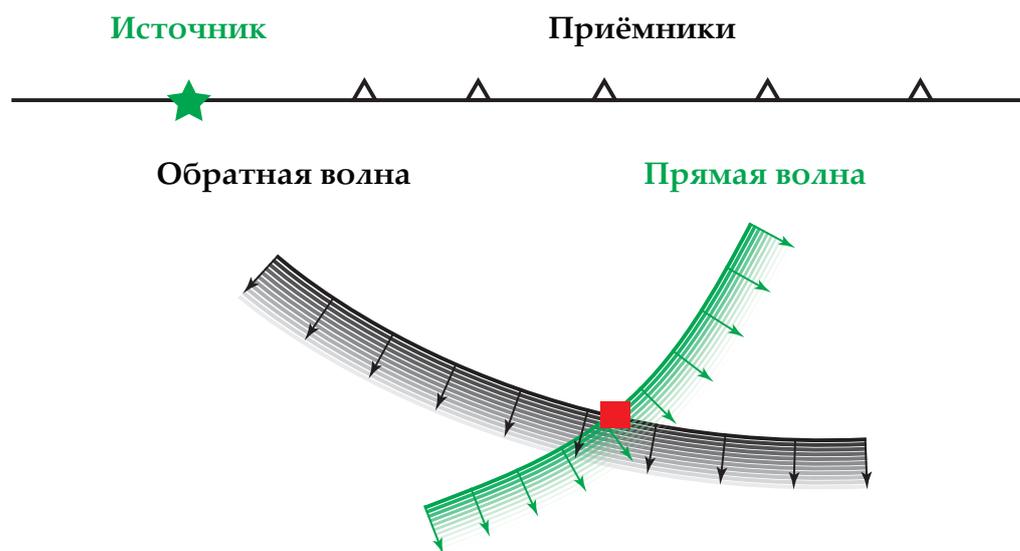


Рис. 2. Схема расчета в общей точке изображения по ADCIG.

Подобные декомпозиции мы будем называть в дальнейшем векторными, поскольку в них используются пары связанных векторов нормали к волновым решениям (1) и (2) одновременно.

На рис. 2 приведена схема взаимодействия волн для векторной ADCIG декомпозиции.

Введение нового параметра γ позволяет осуществлять по нему некоторую дополнительную фильтрацию. Так скалярное произведение векторов падающего и рассеянного поля используется в работах *Stolk и др.* [2009] и *Whitmore, Crawley* [2012]. Фильтрация по углам (α, β) используется в работах [*Koren и Ravve, 2011; Ren и др., 2013; Xie, 2015*]. В работах *Xie, Wu* [2002] и *Yan, Xie* [2009] такая угловая фильтрация называется фильтрацией матрицы локальных изображений (local image matrix). При этом вектора нормалей к волновым фронтам статичны во времени. Данные вида (6) в этом случае будут иметь вид:

$$G(p^f, p^b, \alpha, \beta, x, t, x_s) \subset R^{10}, \quad (7)$$

где $\alpha \in R^1, \beta \in R^1$.

Дальнейшее развитие идеи векторной декомпозиции получили в методе RTH (Reverse Time Holography) [*Erokhin, 2019; Erokhin и др., 2017*]. В нем, для выбранной точки пространства, детально анализируется поведение уже не пары векторов, статичных во времени, а пары взаимосвязанных, меняющихся во времени векторов скорости частиц (b, f) в каждый фиксированный момент времени для каждого источника. Здесь b – вектор скорости частиц в обращенном времени, f – вектор скорости частиц в опорной волне. Вектора скоростей определяются как производные по времени векторов мгновенных смещений частиц акустической среды [*Landau и Lifshitz, 1987*]. вектора являются решением уравнений акустики в первых производных для давлений и векторов скоростей частиц (vector particle velocity). Пространственно-временное поведение векторов скорости обратного рассеяния в каждой точке акустического пространства характеризует среду в окрестности этой точки. На рис. 3 приведены для некоторой точки рассеяния на границе мягкого и жесткого импеданса угловые распределения векторов скорости частиц в падающей прямой волне (рис. 3а) и в обращенной во времени волне (рис. 3б). Частота дискретизации сигнала во времени составляет 2500 Гц. Частота падающего импульса Рикера – 40 Гц. Вектор черного цвета на рис. 3а описывает усредненный по временному ансамблю статичный вектор падающей волны. Среднее направление вектора – минус 80 градусов. Вектор черного цвета на рис. 3б – усредненный по временному ансамблю статичный вектор рассеянной волны. Среднее

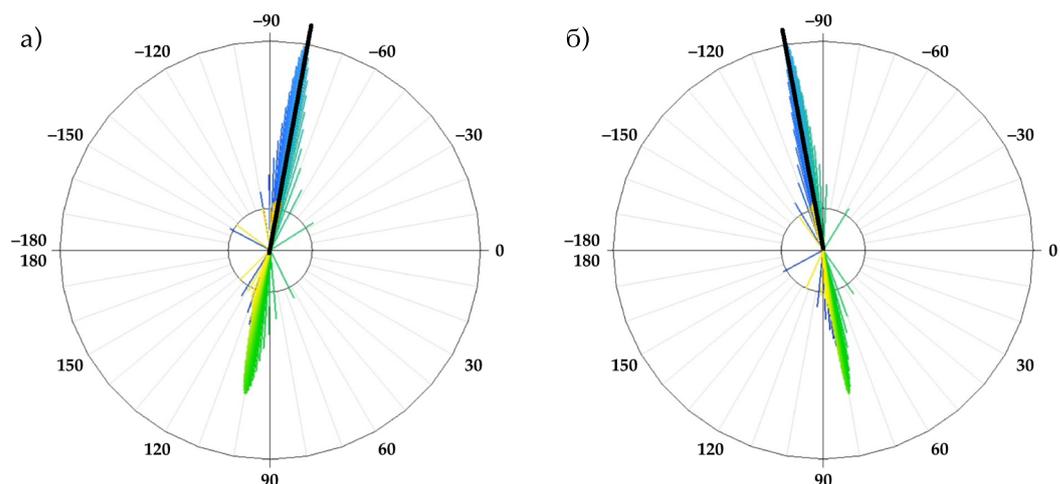


Рис. 3. Изображение двух взаимосвязанных векторов в падающей волне а) и в рассеянной б). Развертка векторов во времени отображается цветом – от синего к зеленому. Статические линии черного цвета отображают усредненные по временному ансамблю вектора падающей волны а) и рассеянной б).

направление – минус 100 градусов. Как нетрудно оценить, двойной угол отражения составляет в этом случае 20 градусов.

Методы ADCIG RTM оперируют, согласно (6)–(7), только усредненными по временному ансамблю векторами скорости и давлениями, результатом же векторной RTM декомпозиции исходного набора данных (3) является расширенный по времени набор данных вида:

$$G(f, b, x, t, x_s) \subset R^{12}. \tag{8}$$

Он носит название Vector Domain Common Image Gathers (VDCIG) [Erokhin, 2019]. В дальнейшем, на этапе оценки сейсмических атрибутов, данные вида (8) могут быть представлены в более удобном виде:

$$G(|f|, |b|, \alpha, \beta, \varphi, \theta, x, t, x_s) \subset R^{12} \tag{9}$$

где φ – азимутальный угол, θ – зенитный угол рассеяния.

Таким образом, размерность пространств параметров сейсмических данных после декомпозиции, базирующейся на решениях (1)–(2), всегда больше размерности исходных данных. Так, для данных 3D ОГТ, размерность исходных данных (3) равняется шести, а размерность информации после RTM декомпозиции (4) уже больше на две единицы и достигает восьми. Для векторной декомпозиции пространство исходных данных (3) переводится формальным оператором A в пространства еще большей размерности – от семи до двенадцати ((6)–(8)). Очевидно, что увеличение параметров декомпозированных данных добавляет новые возможности фильтрации по ним. Следует ожидать, что анализ параметров после векторной декомпозиции, в частности анализ информации VDCIG вида (8)–(9), позволит построить линейку новых сейсмических атрибутов, более детально описывающих свойства исследуемой среды. В разд. 4 настоящей работы представлены сравнительные результаты известных сейсмических атрибутов и их RTM аналогов, а также некоторые принципиально новые атрибуты, полученные за счет расширенной декомпозиции метода RTM.

3. Оценка сейсмических атрибутов

Вторым, не менее важным этапом, чем декомпозиция исходных сейсмических данных, является этап оценки сейсмических атрибутов, или этап синтеза. В векторной сейсморазведке он осуществляется на основе сейсмических данных, принадлежащих расширенным пространствам G вида (4), (6)–(8) или (9) путем их отображения в про-

пространство атрибутов для каждой точки исследуемой среды. Формально этот этап представляет собой отображение данных G в сейсмические атрибуты B неким оператором C :

$$C : G \Rightarrow B,$$

$$B(I, x) \subset R^4,$$

где $I \in R^1, x \in R^3$.

Величина I характеризует некоторую интегральную характеристику сейсмического атрибута в заданной точке пространства. В методе RTM оператор C носит название «условие изображения» (Imaging Condition) и имеет вид [Baysal *u др.*, 1983; McMechan, 1983; Whitmore, 1983]:

$$I(x) = \sum_s \int_0^T p^f(x, t; x_s) p^b(x, t; x_s) dt. \quad (10)$$

Для методов ADCIG-RTM, помимо интенсивности I на этапе синтеза сейсмических атрибутов, по данным (6) также оцениваются и углы раскрытия [Koren *u Ravve*, 2011; Ren *u др.*, 2013; Xie, 2015]:

$$B(I, \gamma, x) \subset R^5, \quad (11)$$

где $\gamma \in R^1, x \in R^3$.

Несколько замечаний касательно формирования атрибута RTM (1), который рассчитывается на основе Imaging Condition (10). В формуле (10) используется произведение двух функций давления: прямого – решение задачи (1) и обратного – решение сопряженной задачи (2). Прямая волна в данном случае служит в первую очередь для автоматической локализации первого вступления в обратной рассеянной волне для заданной нами начальной скоростной модели. Надежды на то, что такое умножение будет усиливать также и все остальные виды так называемых «кратных волн» на практике, как правило, не оправдываются. Это объясняется тем, что изначально мы не знаем саму скоростную модель среды с необходимой детальностью. Этот очевидный факт отмечается в ряде работ [Sava *u Fomel*, 2006; Yan *u др.*, 2014; Yilmaz, *nodate*; Yoon *u Marfurt*, 2006; Zhang *u McMechan*, 2011]. В результате такой неопределенности сформировалось мнение (которое мы разделяем), что метод RTM и его расширения ADCIG при использовании на практике генерируют значительные артефакты, и в то же время, являются более затратными в вычислительном отношении, чем традиционные методы глубинной миграции Кирхгофа [Guan *u др.*, 2013; Vyas *u др.*, 2011]. В связи с этим все попытки улучшить RTM на основе модернизации условия изображения (11), без предварительного детального знания скоростной модели среды, нам представляются также бесперспективными. Выход из такой ситуации только один – пытаться на первом шаге быстро оценить скоростную модель, с необходимой детальностью, а затем уже строить сейсмические атрибуты.

В настоящее время традиционно для этой цели используются два подхода: метод FWI [Tarantola, 1984] и метод Migration Velocity Analysis – MVA [Albertin *u др.*, 2006; Biondi *u Sava*, 1999; Sava *u др.*, 2005]. Однако первый подход весьма вычислительно-емкий и неустойчивый из-за проблемы «cycle-skipping», а второй – достаточно трудоемкий и интерактивный. В последние годы получает распространение метод построения глубинной скоростной модели на основе сверхбыстрой миграции (Fast Beam Migration-FBM) в Гауссовых пучках [Alali *u др.*, 2022; Tanushev *u др.*, 2017].

В идейном плане последний подход наиболее близок к оценке скорости в методе RTM, где изначально, чтобы избежать артефактов, присущих RTM, используются скоростные модели из класса непрерывных функций с положительным градиентом [Erokhin *u Bryksin*, 2020]. Тем самым исключаются из рассмотрения кратные волны. Оценка атрибутов в RTM осуществляется в некоторой малой временной окрестности момента первых вступлений в обращенной волне [Erokhin, 2022]. Для точного определения этого момента принимается гипотеза об энергетической значимости первых

вступлений. В каждой точке среды, с учетом этой гипотезы, определяется невязка времен прихода цугов двух волн – прямой и обратной, аналогично подходу на основе FBM [Tanushev *и др.*, 2017]. После определения временной невязки оцениваются все атрибуты только в окрестности истинных моментов прихода обращенных во времени волн, то есть при скорректированной скоростной модели среды. Временная невязка определяет новое, так называемое локальное время, которое может быть как отрицательным (начальная скоростная модель в данной точке среды занижена по отношению к реальной скорости), так и положительным (начальная скоростная модель в данной точке среды завышена относительно реальной). Момент локального времени, равный нулю, соответствует совпадению предсказанной и реальной скоростей волн. Фактически это характеризует временную зависимость рассеяния в данной точке среды и приводит к возможности работы в средах с частотной/временной зависимостью индикатрисы рассеяния (time-dependent scattering).

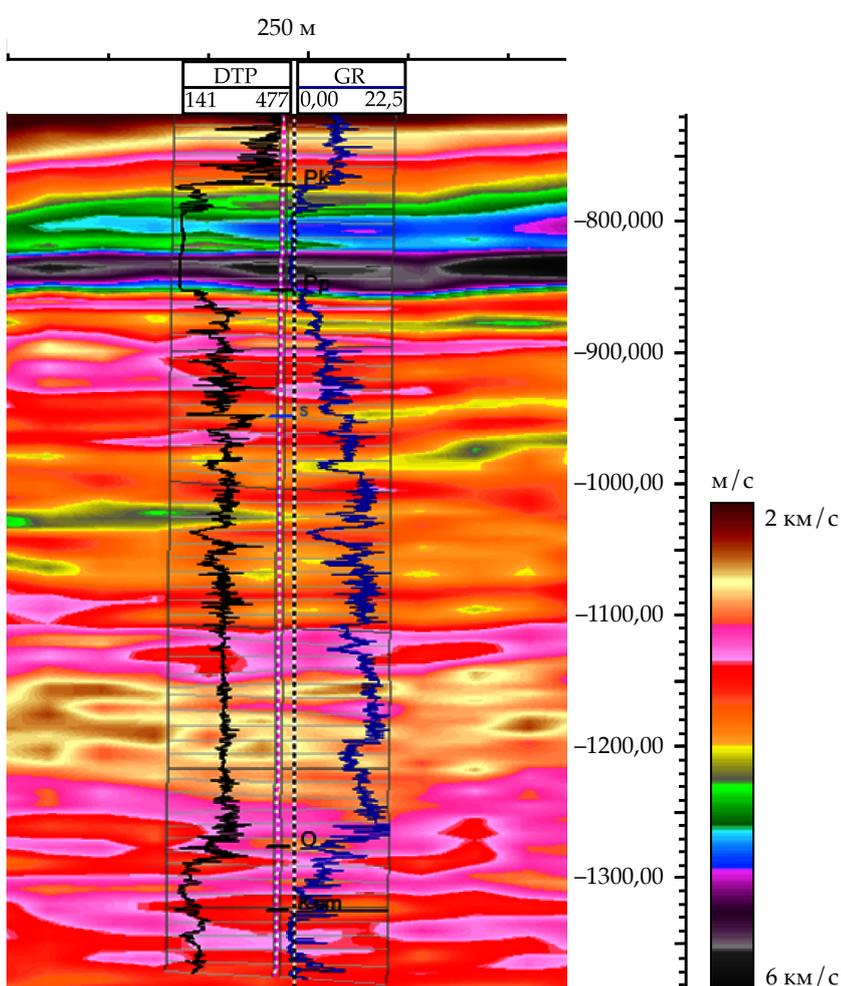


Рис. 4. Сравнение RTN скорости и данных ГИС. Размер пикселя 25 × 5 м. Балтийская синеклиза.

(1000 м), ордовика (1280 м) и кембрия (1320 м), которые также наблюдаются и по данным ГИС.

Пример корректировки RTN скорости по разнице времен прихода прямой волны и обращенной во времени для каждого вокселя геологической среды и примеры RTN атрибутов представлены на рис. 5–рис. 9. Размер вокселя здесь 100 × 100 × 20 метров, площадь участка 250 км². Модель начальной скорости описывается простой градиентной зависимостью по глубине (рис. 5). На рис. 6 представлено нормированное

В методе RTN, после корректировки начальной скорости, на этапе оценки (синтеза) других сейсмических атрибутов появляется возможность построения как стандартных атрибутов глубинной миграции RTM, так и новых, ранее не встречавшихся. Основное отличие в процессе синтеза атрибутов методом RTN состоит в том, что оценка атрибутов в RTN осуществляется для каждого элементарного объема среды (вокселя) независимо друг от друга. Оценка использует стандартные методы статистического анализа 12-мерного случайного распределения. Это основной воксельно-ориентированный принцип построения атрибутов в методе RTN. Результаты опробования метода RTN на модельных данных, включая Marmusi 2, показали высокое качество и устойчивость метода в решении классических задач сейсморазведки [Erokhin, 2019; Erokhin *и др.*, 2018; 2017].

Корректность атрибутов, полученных на основе метода RTN, подтверждается также геологической информацией, например данными каротажа. Так, на рис. 4 представлено сравнение RTN скорости и скважинных данных акустического и гамма каротажа. Размер вокселя здесь составляет 25 м по горизонтали и 5 м по глубине. На глубинах 800–900 м наблюдаются синхронные аномалии как в RTN скорости, так и в кривых геофизического исследования скважины (ГИС). Эти аномалии обусловлены высокоскоростными пермскими отложениями (Pк–Pp). Скорость RTN четко фиксирует наличие силурийских отложений

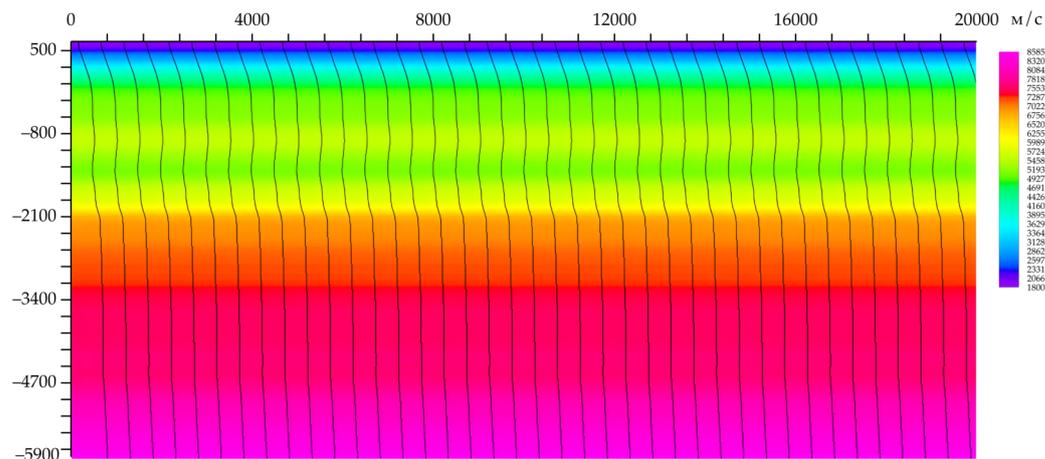


Рис. 5. Модель начальной скорости в м/с. Сечение по глубине, Inline 100.

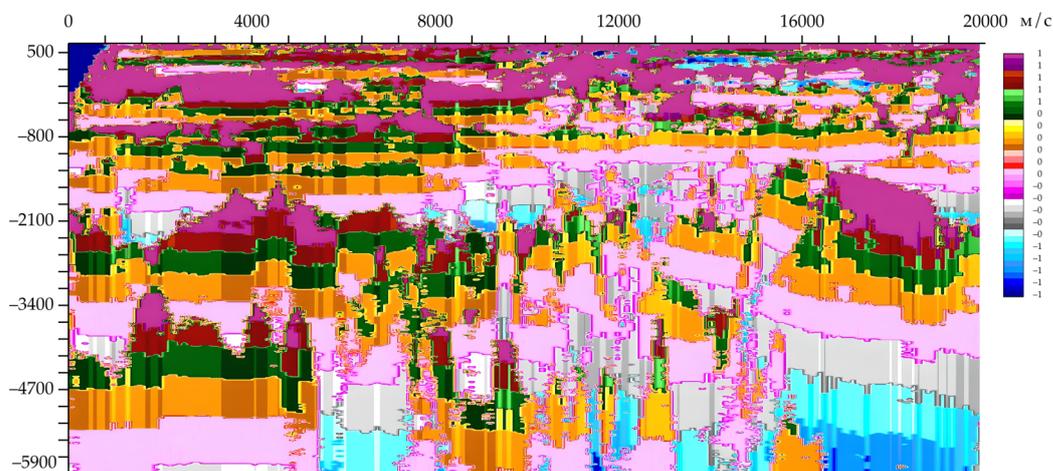


Рис. 6. Атрибут RTH Relative Arrival Time Ratio, безразмерные величины. Нормированное отклонение времени прихода первых вступлений обращенной во времени волны от времени прихода, предсказанного на основе модели начальной скорости. Сечение по глубине, Inline 100.

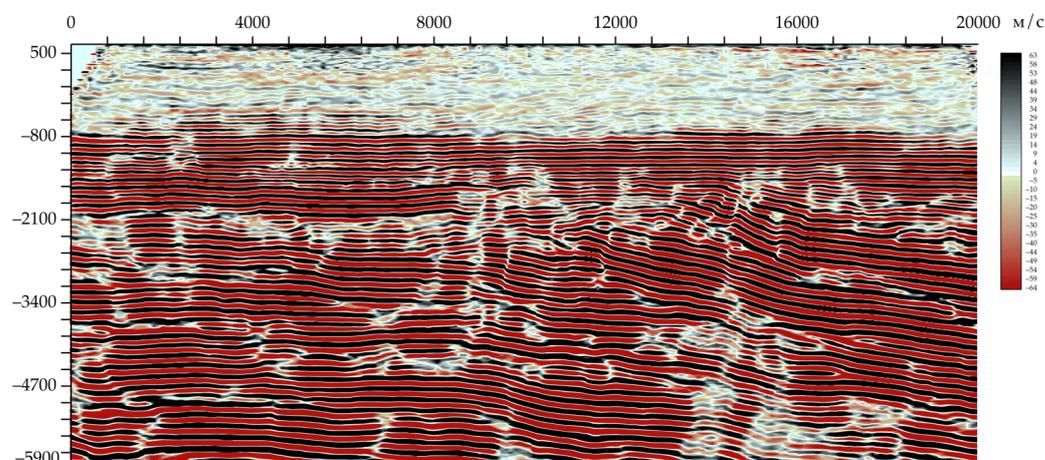


Рис. 7. Атрибут глубинной миграции RTH RTM. Сечение по глубине, Inline 100.

отклонение времени прихода первых вступлений обращенной во времени волны от

времени прихода, предсказанного на основе модели начальной скорости. На основе куба этих временных невязок, используя уравнение эйконала, рассчитывается RTH скорость (рис. 9).

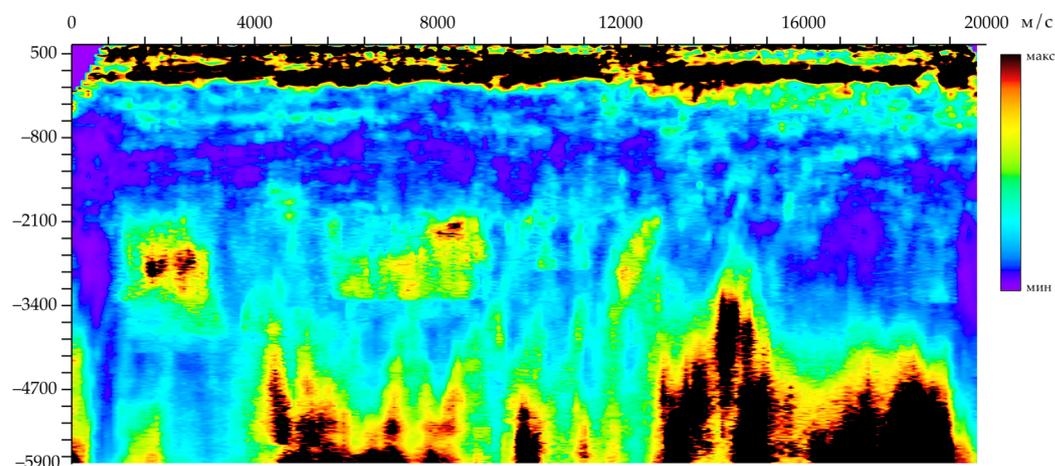


Рис. 8. Атрибут RTH Scattering Index, характеризующий трещиноватость. Условные значения. Сечение по глубине, Inline 100.

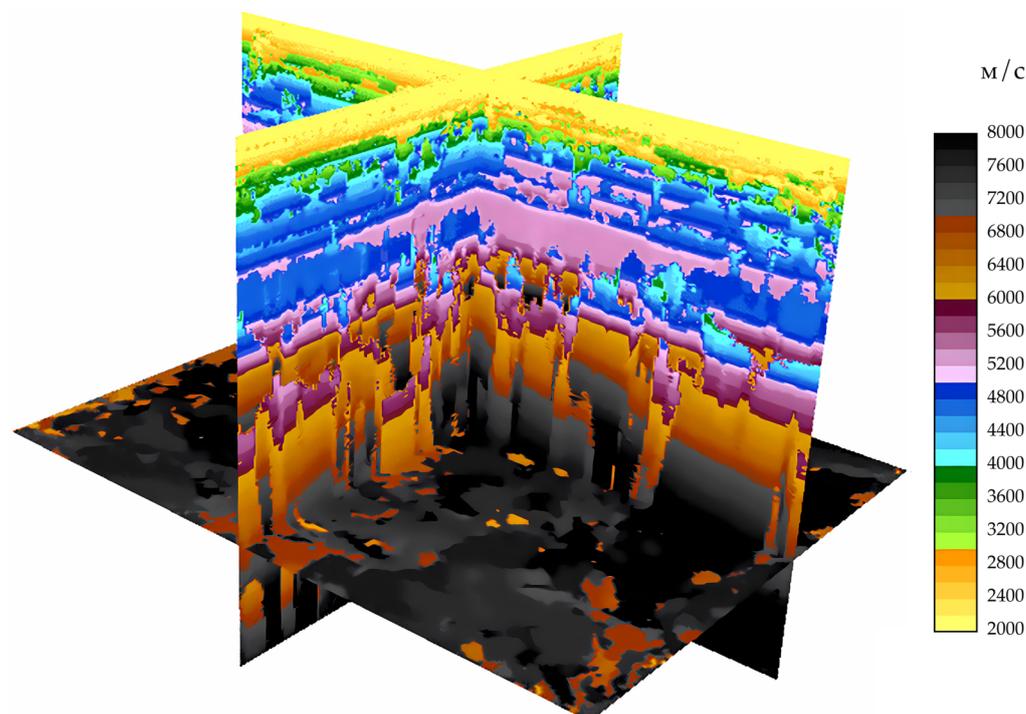
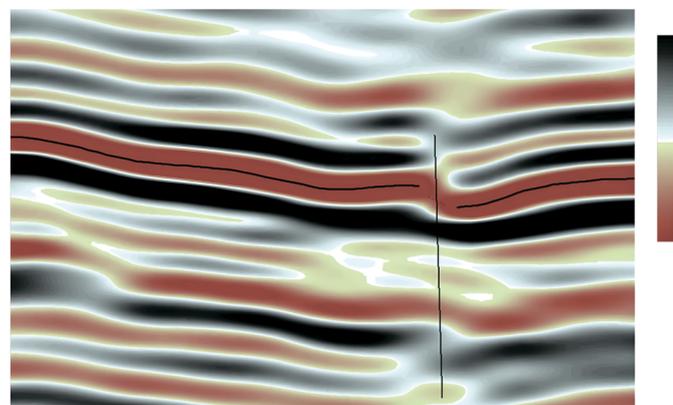


Рис. 9. 3D куб RTH скорости в м/с.

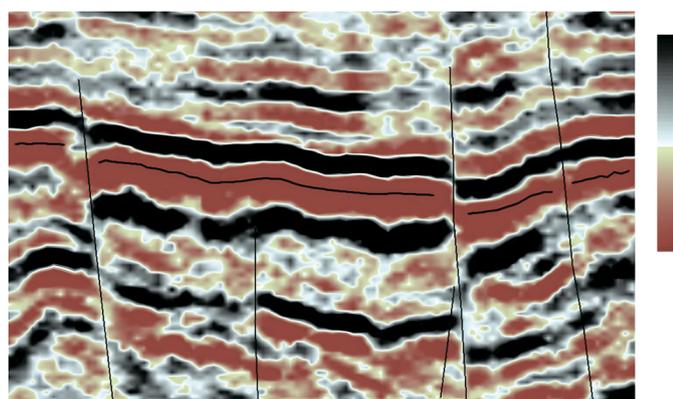
Из-за произвольности начальной скоростной модели получаемая RTH скорость может иметь сдвиг по глубине относительно реальной скорости среды. Настройка такого сдвига по глубине, которая одинакова для всех атрибутов, осуществляется с помощью дополнительной информации о поведении скорости в скважине. Как правило, это делается путем выделения слоев с резким падением скорости (инверсией) как по RTH скорости, так и по скважинным акустическим данным [Erokhin u Bryksin, 2020]. Отметим, что пространственное разрешение как скорости, так и других атрибутов RTH, зависит только от размера вокселя. Примеры других атрибутов представлены на рис. 7, где приведена глубинная миграция, и на рис. 8, где представлено отношение

уровня несинфазного рассеяния к синфазному рассеянию (отношение дифракционной компоненты к отраженной). Зоны сильного рассеяния (красный цвет), как правило, связаны с сильной трещиноватостью пород.

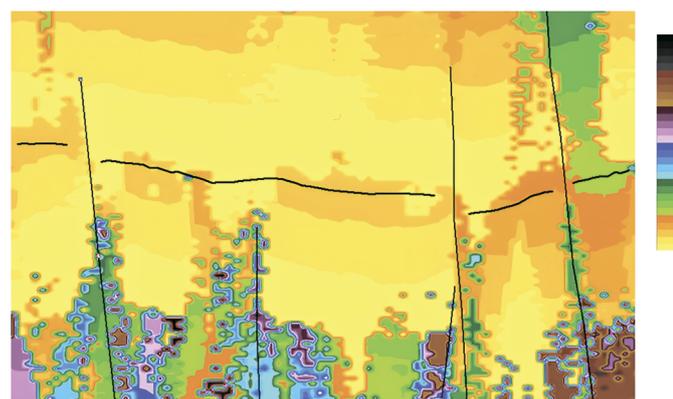
На рис. 10 приведено сравнение результатов традиционной глубинной миграции по методу PSDM (PreStack Depth Migration) и атрибутов RTH на примере месторождения нефти на северо-востоке Непско-Ботубинской нефтегазоносной области Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Здесь длина участка сечения 3D куба – 3,5 км, глубина до 1,9 км. Промышленные скопления нефти и газа установлены в широком диапазоне разреза – от подсолевого карбонатного комплекса венда-нижнего кембрия до терригенной базальной толщи венда. На рис. 10а представлен результат стандартной миграции PSDM. На рис. 10б приведен фазовый атрибут RTH, позволяющий получить максимально разрешенную картину с сохранением динамических особенностей. На рис. 10с изображен атрибут RTH, отвечающий за скоростные изменения среды. Желтый цвет здесь соответствует максимальным скоростям. Очевидно, что атрибуты RTH имеют большее, чем обычные миграционные изображения, пространственное разрешение, а также на них проявляются не только детали разломной сети, но и оперяющие эти разломы зоны пониженной скорости и повышенной трещиноватости. На рис. 11 приведена серия разрезов глубинной RTH скорости высокого пространственного разрешения в режиме «zoom». Красный цвет здесь – высокая скорость. Размер пикселя – 12,5 × 2,5 метра. Для демонстрации разрешения скоростной разрез совмещен с кривой гамма-каротажа. Для информативности разрезы совмещены также со скоростями в виде «wiggles». По этим кривым видно, что детальность скоростного разреза в RTH приближается к детальности скважинных измерений.



а)



б)



в)

Рис. 10. Сравнение глубинных сечений 3D кубов PSDM (а), RTH (б) и RTH скорости (с). Размер пространственного вокселя – 25 × 25 × 5 метров.

в данные пространства большей размерности, обеспечивает решение широкого круга задач поиска и разработки месторождений углеводородов на новом качественном уровне. В силу своего построения метод RTH обобщает методы глубинной миграции, акустической инверсии, а в части скоростной томографии является альтернативой

4. Заключение

В статье с единой точки зрения дан обзор современных методов декомпозиции исходных сейсмических данных в данные, принадлежащие пространствам большей размерности. Разделение графа обработки сейсмических данных на два этапа для методов, использующих двухлучевую векторную декомпозицию на базе обращенных во времени решений уравнений акустики, позволяет системно выделять различия в подходах построения сейсмических атрибутов уже на этапе декомпозиции данных и прогнозировать их дальнейшее перспективное развитие. Многообразие глубинных сейсмических атрибутов, получаемых в методе RTH на основе декомпозиции исходных сейсмических данных

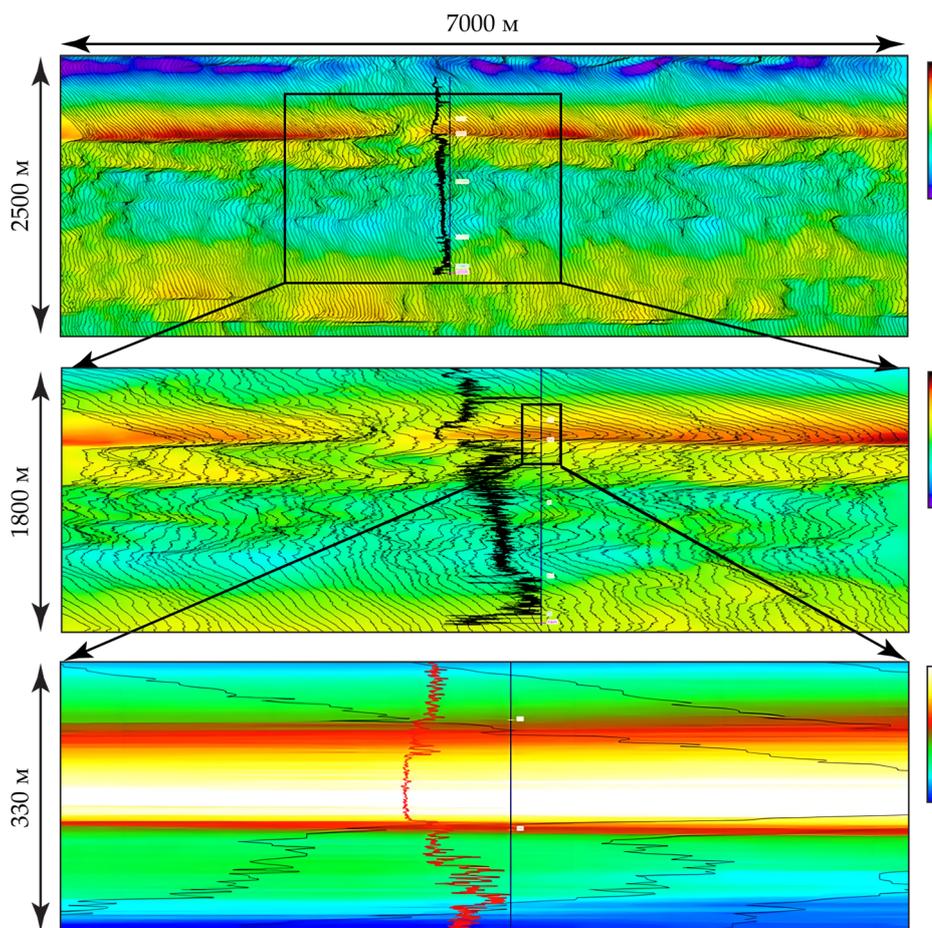


Рис. 11. Иллюстрация пространственного разрешения RHT скорости. Размер пространственной ячейки – $12,5 \times 2,5$ м. Профиль 2D съемки. Сравнение с кривой гамма-каротажа в скважине (на нижнем разрезе изображена красным). Красный цвет палитры – максимальные значения RHT скорости.

методам миграционного скоростного анализа и методам полноволновой инверсии. Отмечается тесная связь техники обращения волнового фронта во времени в сейсмике с аналогичным обращением в оптике и акустике. Показаны перспективы использования нового метода RHT в решении практических задач нефтегазоведения. Метод RHT успешно опробован на 21 нефтяном и газовом месторождениях, расположенных в различных нефтегазовых провинциях РФ.

Благодарности. Авторы благодарят Виталия Брыксина, Сергея Сергеева, Максима Козлова, Екатерину Анохину и Светлану Шевченко за помощь и полезное участие. Авторы благодарят НИЦ «Курчатовский институт» за предоставление вычислительных ресурсов. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-69-00231, <https://rscf.ru/project/22-69-00231/>.

Список литературы

- Alali A., Tanushev N., Tsingas C. Depth Velocity Model Building on Blended Data Via Beam Tomography // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. — С. 1–5. — DOI: [10.3997/2214-4609.202210594](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202210594).
- Albertin U., Sava P., Etgen J. *и др.* Adjoint wave-equation velocity analysis // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2006. — Society of Exploration Geophysicists, 2006. — С. 3345–3349. — DOI: [10.1190/1.2370226](https://doi.org/10.1190/1.2370226).

- Alekseev A. S., Erokhin G. N. Integration in geophysical inverse problems (Integrated Geophysics) // USSR Academy of Sciences Proceedings. — 1989. — Т. 308, № 6. — С. 1–6.
- Alkhalifah T. Scattering-angle based filtering of the waveform inversion gradients // Geophysical Journal International. — 2015. — Т. 200, № 1. — С. 363–373. — DOI: [10.1093/gji/ggu379](https://doi.org/10.1093/gji/ggu379).
- Anikonov Y. E., Bubnov B. A., Erokhin G. N. Inverse and Ill-Posed Sources Problems. — Berlin, Boston : DE GRUYTER, 1997. — С. 239. — DOI: [10.1515/9783110969412](https://doi.org/10.1515/9783110969412).
- Baysal E., Kosloff D. D., Sherwood J. W. C. Reverse time migration // GEOPHYSICS. — 1983. — Т. 48, № 11. — С. 1514–1524. — DOI: [10.1190/1.1441434](https://doi.org/10.1190/1.1441434).
- Biondi B., Sava P. Wave-equation migration velocity analysis // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999. — Society of Exploration Geophysicists, 1999. — С. 1723–1726. — DOI: [10.1190/1.1820867](https://doi.org/10.1190/1.1820867).
- Erokhin G. Reverse time holography approach based on the vector domain common image gathers // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. — Society of Exploration Geophysicists, 2019. — С. 4107–4111. — DOI: [10.1190/segam2019-3201622.1](https://doi.org/10.1190/segam2019-3201622.1).
- Erokhin G. Time-dependent scattering in reverse time holography method // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. — С. 1–5. — DOI: [10.3997/2214-4609.202210094](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202210094).
- Erokhin G., Bryksin V. High-resolution velocity model estimation by the RTH method // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020. — Society of Exploration Geophysicists, 2020. — С. 2863–2867. — DOI: [10.1190/segam2020-3410422.1](https://doi.org/10.1190/segam2020-3410422.1).
- Erokhin G., Danilin A., Kozlov M. Extension of the common image gathers by VPRM method // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018. — Society of Exploration Geophysicists, 2018. — С. 4438–4442. — DOI: [10.1190/segam2018-2995971.1](https://doi.org/10.1190/segam2018-2995971.1).
- Erokhin G., Pestov L., Danilin A. *u dp*. Interconnected vector pairs image conditions: New possibilities for visualization of acoustical media // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. — Society of Exploration Geophysicists, 2017. — С. 4624–4629. — DOI: [10.1190/segam2017-17587902.1](https://doi.org/10.1190/segam2017-17587902.1).
- Fink M. Time Reversed Acoustics // Physics Today. — 1997. — Т. 50, № 3. — С. 34–40. — DOI: [10.1063/1.881692](https://doi.org/10.1063/1.881692).
- Guan H., Williamson P., Denel B. *u dp*. Angle-domain common-image gathers extracted from pre-stack RTM images // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013. — Society of Exploration Geophysicists, 2013. — С. 3767–3772. — DOI: [10.1190/segam2013-1149.1](https://doi.org/10.1190/segam2013-1149.1).
- Khaidukov V., Landa E., Moser T. J. Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution // GEOPHYSICS. — 2004. — Т. 69, № 6. — С. 1478–1490. — DOI: [10.1190/1.1836821](https://doi.org/10.1190/1.1836821).
- Koren Z., Ravve I. Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging Part I: Directional and reflection image gathers // GEOPHYSICS. — 2011. — Т. 76, № 1. — S1–S13. — DOI: [10.1190/1.3511352](https://doi.org/10.1190/1.3511352).
- Kremlev A. N., Erokhin G. N., Starikov L. E. *u dp*. Fracture and cavernous reservoirs prospecting by the CSP prestack migration method // 73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011. — EAGE Publications BV, 2011. — DOI: [10.3997/2214-4609.20148996](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20148996).
- Landa E., Shtivelman V., Gelchinsky B. A method for detection of diffracted waves on common-offset sections // Geophysical Prospecting. — 1987. — Т. 35, № 4. — С. 359–373. — DOI: [10.1111/j.1365-2478.1987.tb00823.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1987.tb00823.x).
- Landau L. D., Lifshitz E. M. Fluid Mechanics. 2nd ed. — Pergamon Books Ltd., 1987. — С. 532.
- McMechan G. A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values // Geophysical Prospecting. — 1983. — Т. 31, № 3. — С. 413–420. — DOI: [10.1111/j.1365-2478.1983.tb01060.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01060.x).
- Moser T. J., Howard C. B. Diffraction imaging in depth // Geophysical Prospecting. — 2008. — Т. 56, № 5. — С. 627–641. — DOI: [10.1111/j.1365-2478.2007.00718.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00718.x).
- Mosher C. C., Foster D. J. Common angle imaging conditions for pre-stack depth migration // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000. — Society of Exploration Geophysicists, 2000. — С. 830–833. — DOI: [10.1190/1.1816200](https://doi.org/10.1190/1.1816200).
- Plessix R.-E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications // Geophysical Journal International. — 2006. — Т. 167, № 2. — С. 495–503. — DOI: [10.1111/j.1365-246x.2006.02978.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2006.02978.x).
- Popovici A. M., Sturzu I., Moser T. J. High Resolution Diffraction Imaging of Small Scale Fractures in Shale and Carbonate Reservoirs // 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 3–6 August 2015. — Brazilian Geophysical Society, 2015. — DOI: [10.1190/sbgf2015-153](https://doi.org/10.1190/sbgf2015-153).
- Ren L., Liu G., Meng X. *u dp*. Suppressing Artifacts in 2D RTM Using the Poynting Vector // Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, Beijing, China 17–19 July 2013. — Society of Exploration Geophysicists, Australian Society of Exploration Geophysicists, Chinese Geophysical Society, Korean Society of Earth, Exploration Geophysicists, Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2013. — С. 484–487. — DOI: [10.1190/nsgapc2013-112](https://doi.org/10.1190/nsgapc2013-112).
- Rosales D. A., Biondi B. Converted-waves angle-domain common-image gathers // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005. — Society of Exploration Geophysicists, 2005. — С. 959–962. — DOI: [10.1190/1.2148320](https://doi.org/10.1190/1.2148320).

- Sava P., Fomel S. Time-shift imaging condition in seismic migration // GEOPHYSICS. — 2006. — Т. 71, № 6. — S209–S217. — DOI: [10.1190/1.2338824](https://doi.org/10.1190/1.2338824).
- Sava P. C., Biondi B., Etgen J. Wave-equation migration velocity analysis by focusing diffractions and reflections // GEOPHYSICS. — 2005. — Т. 70, № 3. — U19–U27. — DOI: [10.1190/1.1925749](https://doi.org/10.1190/1.1925749).
- Stolk C. C., Hoop M. V. D., Root T. J. P. M. O. Inverse scattering of seismic data in the reverse time migration (RTM) approach // Proceedings of the Project Review. Т. 1. — Geo-Mathematical Imaging Group (Purdue University, West Lafayette IN), 2009. — С. 91–108.
- Tanushev N., Popovici A. M., Hardesty S. Fast, high-resolution beam tomography and velocity-model building // The Leading Edge. — 2017. — Т. 36, № 2. — С. 140–145. — DOI: [10.1190/tle36020140.1](https://doi.org/10.1190/tle36020140.1).
- Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation // GEOPHYSICS. — 1984. — Т. 49, № 8. — С. 1259–1266. — DOI: [10.1190/1.1441754](https://doi.org/10.1190/1.1441754).
- Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // GEOPHYSICS. — 2009. — Т. 74, № 6. — С. 1–26. — DOI: [10.1190/1.3238367](https://doi.org/10.1190/1.3238367).
- Vyas M., Nichols D., Mobley E. Efficient RTM angle gathers using source directions // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. — Society of Exploration Geophysicists, 2011. — С. 3104–3108. — DOI: [10.1190/1.3627840](https://doi.org/10.1190/1.3627840).
- Wang W., McMechan G. A. Vector-based elastic reverse time migration // GEOPHYSICS. — 2015. — Т. 80, № 6. — С. 245–258. — DOI: [10.1190/geo2014-0620.1](https://doi.org/10.1190/geo2014-0620.1).
- Whitmore N. D. Iterative depth migration by backward time propagation // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1983. — Society of Exploration Geophysicists, 1983. — С. 382–385. — DOI: [10.1190/1.1893867](https://doi.org/10.1190/1.1893867).
- Whitmore N. D., Crawley S. Applications of RTM inverse scattering imaging conditions // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. — 2012. — С. 1–6. — DOI: [10.1190/segam2012-0779.1](https://doi.org/10.1190/segam2012-0779.1).
- Xie X.-B. An angle-domain wavenumber filter for multi-scale full-waveform inversion // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015. — Society of Exploration Geophysicists, 2015. — С. 1132–1137. — DOI: [10.1190/segam2015-5877023.1](https://doi.org/10.1190/segam2015-5877023.1).
- Xie X.-B., Wu R.-S. Extracting angle domain information from migrated wavefield // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2002. — Society of Exploration Geophysicists, 2002. — С. 1360–1363. — DOI: [10.1190/1.1816910](https://doi.org/10.1190/1.1816910).
- Yan R., Guan H., Xie X.-B. $u \partial p$. Acquisition aperture correction in the angle domain toward true-reflection reverse time migration // GEOPHYSICS. — 2014. — Т. 79, № 6. — С. 241–250. — DOI: [10.1190/geo2013-0324.1](https://doi.org/10.1190/geo2013-0324.1).
- Yan R., Xie X.-B. A new angle-domain imaging condition for prestack reverse-time migration // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009. — Society of Exploration Geophysicists, 2009. — С. 2784–2788. — DOI: [10.1190/1.3255427](https://doi.org/10.1190/1.3255427).
- Yilmaz O. Seismic Data Analysis : Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data (Investigations in Geophysics, No. 10). — Society of Exploration. — С. 2027.
- Yoon K., Marfurt K. J. Reverse-time migration using the Poynting vector // Exploration Geophysics. — 2006. — Т. 37, № 1. — С. 102–107. — DOI: [10.1071/EG06102](https://doi.org/10.1071/EG06102).
- Zel'dovich B. Y., Popovichev V. I., Ragulsky V. V. $u \partial p$. On the connection between wavefronts of reflected and exciting light in stimulated scattering of Mandelstam-Brünnen // Letters to ZhETF. — 1972. — Т. 15, № 3. — С. 160–164.
- Zhang Q., McMechan G. A. Direct vector-field method to obtain angle-domain common-image gathers from isotropic acoustic and elastic reverse time migration // GEOPHYSICS. — 2011. — Т. 76, № 5. — С. 135–149. — DOI: [10.1190/geo2010-0314.1](https://doi.org/10.1190/geo2010-0314.1).
- Zhu X., Wu R.-S. Imaging diffraction points using the local image matrix in prestack migration // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008. — Society of Exploration Geophysicists, 2008. — С. 2161–2165. — DOI: [10.1190/1.3063853](https://doi.org/10.1190/1.3063853).

VECTOR-BASED SEISMIC DECOMPOSITION BY REVERSE TIME METHODS

V. M. Agafonov¹, A. S. Bugaev², G. N. Erokhin^{**3}, A. L. Ronzhin⁴

¹LLC “R-Sensor”, 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Russia

²Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

⁴St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

****Correspondence to:** Gennady Erokhin, gerokhin@kantiana.ru

The paper analyzes the decomposition of the initial seismic data by the methods of wave reversal in time when constructing seismic attributes. Within the framework of a formal approach to decomposition, as a mapping of data from one space into data of a larger dimension, a classification of existing seismic survey methods is given. Separation of the stage of decomposition in seismic data processing makes it possible to streamline the existing directions of research in this area of seismic exploration. The vector decomposition, which is the basis of a new method of seismic data processing Reverse Time Holography (RTH), is analyzed in detail. The RTH method includes, as a special case, the depth migration method, the offset reflection amplitude analysis method, the acoustic inversion method, and is an alternative to the migration-based velocity estimation method and the full wave inversion method. A close connection between the technique of wavefront time reversal in seismic exploration and analogous time reversal in optics and acoustics is noted. The variety of deep seismic attributes obtained in the RTH method based on vector decomposition makes it possible to solve a wide range of practical problems of prospecting and developing hydrocarbon deposits at a new qualitative level. The RTH method has been successfully tested at 21 hydrocarbon fields in various oil and gas provinces of the Russian Federation.

Received: 5 November 2022

Accepted: 23 January 2023

Published: 11 September 2023

Keywords: seismic, time reverse, scattering, seismic attributes, migration, decomposition

Citation: Agafonov, V. M., A. S. Bugaev, G. N. Erokhin, A. L. Ronzhin (2023), Vector-Based Seismic Decomposition by Reverse Time Methods, *Russ. J. Earth. Sci.*, 23, ES3010, <https://doi.org/10.2205/2023ES000843>



© 2023. The Authors.

References

- Alali A., Tanushev N., Tsingas C. Depth Velocity Model Building on Blended Data Via Beam Tomography // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. — P. 1–5. — DOI: [10.3997/2214-4609.202210594](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202210594).
- Albertin U., Sava P., Etgen J., *et al.* Adjoint wave-equation velocity analysis // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2006. — Society of Exploration Geophysicists, 2006. — P. 3345–3349. — DOI: [10.1190/1.2370226](https://doi.org/10.1190/1.2370226).
- Alekseev A. S., Erokhin G. N. Integration in geophysical inverse problems (Integrated Geophysics) // USSR Academy of Sciences Proceedings. — 1989. — Vol. 308, no. 6. — P. 1–6.
- Alkhalifah T. Scattering-angle based filtering of the waveform inversion gradients // Geophysical Journal International. — 2015. — Vol. 200, no. 1. — P. 363–373. — DOI: [10.1093/gji/ggu379](https://doi.org/10.1093/gji/ggu379).
- Anikonov Y. E., Bubnov B. A., Erokhin G. N. Inverse and Ill-Posed Sources Problems. — Berlin, Boston : DE GRUYTER, 1997. — P. 239. — DOI: [10.1515/9783110969412](https://doi.org/10.1515/9783110969412).

- Baysal E., Kosloff D. D., Sherwood J. W. C. Reverse time migration // GEOPHYSICS. — 1983. — Vol. 48, no. 11. — P. 1514–1524. — DOI: [10.1190/1.1441434](https://doi.org/10.1190/1.1441434).
- Biondi B., Sava P. Wave-equation migration velocity analysis // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999. — Society of Exploration Geophysicists, 1999. — P. 1723–1726. — DOI: [10.1190/1.1820867](https://doi.org/10.1190/1.1820867).
- Erokhin G. Reverse time holography approach based on the vector domain common image gathers // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. — Society of Exploration Geophysicists, 2019. — P. 4107–4111. — DOI: [10.1190/segam2019-3201622.1](https://doi.org/10.1190/segam2019-3201622.1).
- Erokhin G. Time-dependent scattering in reverse time holography method // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. — P. 1–5. — DOI: [10.3997/2214-4609.202210094](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202210094).
- Erokhin G., Bryksin V. High-resolution velocity model estimation by the RTH method // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020. — Society of Exploration Geophysicists, 2020. — P. 2863–2867. — DOI: [10.1190/segam2020-3410422.1](https://doi.org/10.1190/segam2020-3410422.1).
- Erokhin G., Danilin A., Kozlov M. Extension of the common image gathers by VPRTM method // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018. — Society of Exploration Geophysicists, 2018. — P. 4438–4442. — DOI: [10.1190/segam2018-2995971.1](https://doi.org/10.1190/segam2018-2995971.1).
- Erokhin G., Pestov L., Danilin A., *et al.* Interconnected vector pairs image conditions: New possibilities for visualization of acoustical media // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. — Society of Exploration Geophysicists, 2017. — P. 4624–4629. — DOI: [10.1190/segam2017-17587902.1](https://doi.org/10.1190/segam2017-17587902.1).
- Fink M. Time Reversed Acoustics // Physics Today. — 1997. — Vol. 50, no. 3. — P. 34–40. — DOI: [10.1063/1.881692](https://doi.org/10.1063/1.881692).
- Guan H., Williamson P., Denel B., *et al.* Angle-domain common-image gathers extracted from pre-stack RTM images // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013. — Society of Exploration Geophysicists, 2013. — P. 3767–3772. — DOI: [10.1190/segam2013-1149.1](https://doi.org/10.1190/segam2013-1149.1).
- Khaidukov V., Landa E., Moser T. J. Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution // GEOPHYSICS. — 2004. — Vol. 69, no. 6. — P. 1478–1490. — DOI: [10.1190/1.1836821](https://doi.org/10.1190/1.1836821).
- Koren Z., Ravve I. Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging Part I: Directional and reflection image gathers // GEOPHYSICS. — 2011. — Vol. 76, no. 1. — S1–S13. — DOI: [10.1190/1.3511352](https://doi.org/10.1190/1.3511352).
- Kremlev A. N., Erokhin G. N., Starikov L. E., *et al.* Fracture and cavernous reservoirs prospecting by the CSP prestack migration method // 73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011. — EAGE Publications BV, 2011. — DOI: [10.3997/2214-4609.20148996](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20148996).
- Landa E., Shtivelman V., Gelchinsky B. A method for detection of diffracted waves on common-offset sections // Geophysical Prospecting. — 1987. — Vol. 35, no. 4. — P. 359–373. — DOI: [10.1111/j.1365-2478.1987.tb00823.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1987.tb00823.x).
- Landau L. D., Lifshitz E. M. Fluid Mechanics. 2nd ed. — Pergamon Books Ltd., 1987. — P. 532.
- McMechan G. A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values // Geophysical Prospecting. — 1983. — Vol. 31, no. 3. — P. 413–420. — DOI: [10.1111/j.1365-2478.1983.tb01060.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01060.x).
- Moser T. J., Howard C. B. Diffraction imaging in depth // Geophysical Prospecting. — 2008. — Vol. 56, no. 5. — P. 627–641. — DOI: [10.1111/j.1365-2478.2007.00718.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00718.x).
- Mosher C. C., Foster D. J. Common angle imaging conditions for pre-stack depth migration // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000. — Society of Exploration Geophysicists, 2000. — P. 830–833. — DOI: [10.1190/1.1816200](https://doi.org/10.1190/1.1816200).
- Plessix R.-E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications // Geophysical Journal International. — 2006. — Vol. 167, no. 2. — P. 495–503. — DOI: [10.1111/j.1365-246x.2006.02978.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2006.02978.x).
- Popovici A. M., Sturzu I., Moser T. J. High Resolution Diffraction Imaging of Small Scale Fractures in Shale and Carbonate Reservoirs // 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 3–6 August 2015. — Brazilian Geophysical Society, 2015. — DOI: [10.1190/sbgf2015-153](https://doi.org/10.1190/sbgf2015-153).
- Ren L., Liu G., Meng X., *et al.* Suppressing Artifacts in 2D RTM Using the Poynting Vector // Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, Beijing, China 17–19 July 2013. — Society of Exploration Geophysicists, Australian Society of Exploration Geophysicists, Chinese Geophysical Society, Korean Society of Earth, Exploration Geophysicists, Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2013. — P. 484–487. — DOI: [10.1190/nsgapc2013-112](https://doi.org/10.1190/nsgapc2013-112).
- Rosales D. A., Biondi B. Converted-waves angle-domain common-image gathers // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005. — Society of Exploration Geophysicists, 2005. — P. 959–962. — DOI: [10.1190/1.2148320](https://doi.org/10.1190/1.2148320).
- Sava P., Fomel S. Time-shift imaging condition in seismic migration // GEOPHYSICS. — 2006. — Vol. 71, no. 6. — S209–S217. — DOI: [10.1190/1.2338824](https://doi.org/10.1190/1.2338824).
- Sava P. C., Biondi B., Etgen J. Wave-equation migration velocity analysis by focusing diffractions and reflections // GEOPHYSICS. — 2005. — Vol. 70, no. 3. — U19–U27. — DOI: [10.1190/1.1925749](https://doi.org/10.1190/1.1925749).

- Stolk C. C., Hoop M. V. D., Root T. J. P. M. O. Inverse scattering of seismic data in the reverse time migration (RTM) approach // Proceedings of the Project Review. Vol. 1. — Geo-Mathematical Imaging Group (Purdue University, West Lafayette IN), 2009. — P. 91–108.
- Tanushev N., Popovici A. M., Hardesty S. Fast, high-resolution beam tomography and velocity-model building // The Leading Edge. — 2017. — Vol. 36, no. 2. — P. 140–145. — DOI: [10.1190/tle36020140.1](https://doi.org/10.1190/tle36020140.1).
- Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation // GEOPHYSICS. — 1984. — Vol. 49, no. 8. — P. 1259–1266. — DOI: [10.1190/1.1441754](https://doi.org/10.1190/1.1441754).
- Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // GEOPHYSICS. — 2009. — Vol. 74, no. 6. — P. 1–26. — DOI: [10.1190/1.3238367](https://doi.org/10.1190/1.3238367).
- Vyas M., Nichols D., Mobley E. Efficient RTM angle gathers using source directions // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. — Society of Exploration Geophysicists, 2011. — P. 3104–3108. — DOI: [10.1190/1.3627840](https://doi.org/10.1190/1.3627840).
- Wang W., McMechan G. A. Vector-based elastic reverse time migration // GEOPHYSICS. — 2015. — Vol. 80, no. 6. — P. 245–258. — DOI: [10.1190/geo2014-0620.1](https://doi.org/10.1190/geo2014-0620.1).
- Whitmore N. D. Iterative depth migration by backward time propagation // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1983. — Society of Exploration Geophysicists, 1983. — P. 382–385. — DOI: [10.1190/1.1893867](https://doi.org/10.1190/1.1893867).
- Whitmore N. D., Crawley S. Applications of RTM inverse scattering imaging conditions // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. — 2012. — P. 1–6. — DOI: [10.1190/segam2012-0779.1](https://doi.org/10.1190/segam2012-0779.1).
- Xie X.-B. An angle-domain wavenumber filter for multi-scale full-waveform inversion // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015. — Society of Exploration Geophysicists, 2015. — P. 1132–1137. — DOI: [10.1190/segam2015-5877023.1](https://doi.org/10.1190/segam2015-5877023.1).
- Xie X.-B., Wu R.-S. Extracting angle domain information from migrated wavefield // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2002. — Society of Exploration Geophysicists, 2002. — P. 1360–1363. — DOI: [10.1190/1.1816910](https://doi.org/10.1190/1.1816910).
- Yan R., Guan H., Xie X.-B., *et al.* Acquisition aperture correction in the angle domain toward true-reflection reverse time migration // GEOPHYSICS. — 2014. — Vol. 79, no. 6. — P. 241–250. — DOI: [10.1190/geo2013-0324.1](https://doi.org/10.1190/geo2013-0324.1).
- Yan R., Xie X.-B. A new angle-domain imaging condition for prestack reverse-time migration // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009. — Society of Exploration Geophysicists, 2009. — P. 2784–2788. — DOI: [10.1190/1.3255427](https://doi.org/10.1190/1.3255427).
- Yilmaz O. Seismic Data Analysis : Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data (Investigations in Geophysics, No. 10). — Society of Exploration. — P. 2027.
- Yoon K., Marfurt K. J. Reverse-time migration using the Poynting vector // Exploration Geophysics. — 2006. — Vol. 37, no. 1. — P. 102–107. — DOI: [10.1071/EG06102](https://doi.org/10.1071/EG06102).
- Zel'dovich B. Y., Popovichev V. I., Ragulsky V. V., *et al.* On the connection between wavefronts of reflected and exciting light in stimulated scattering of Mandelstam-Brünnen // Letters to ZhETF. — 1972. — Vol. 15, no. 3. — P. 160–164.
- Zhang Q., McMechan G. A. Direct vector-field method to obtain angle-domain common-image gathers from isotropic acoustic and elastic reverse time migration // GEOPHYSICS. — 2011. — Vol. 76, no. 5. — P. 135–149. — DOI: [10.1190/geo2010-0314.1](https://doi.org/10.1190/geo2010-0314.1).
- Zhu X., Wu R.-S. Imaging diffraction points using the local image matrix in prestack migration // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008. — Society of Exploration Geophysicists, 2008. — P. 2161–2165. — DOI: [10.1190/1.3063853](https://doi.org/10.1190/1.3063853).