

УДК 550.34.013.4

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-6-114-129

АЛГОРИТМЫ ГЛУБИННОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МИГРАЦИИ В ДВУМЕРНЫХ СРЕДАХ

Павел Юрьевич Степанов¹, Юлия Александровна Гоманюк²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; seismic310@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8131-8998>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; juliagmn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1253-4689>

Аннотация. В работе рассмотрены четыре алгоритма кинематической миграции (процедуры преобразования времен прихода отраженных волн к земной поверхности в глубины залегания отражающих границ), использующие среднескоростную и пластовую скоростные модели слоистых сред: стандартный алгоритм пересчета времен в глубины через средние скорости; модифицированный среднескоростной алгоритм, учитывающий наклон сейсмических границ; алгоритм послойного пересчета линий t_0 в глубины; вариационный алгоритм кинематической миграции, основанный на теории лучевого трассирования способом интегрирования методом Рунге–Кутты системы дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями. Для исследования возможностей и ограничений каждого из алгоритмов были проведены расчеты на ряде теоретических моделей слоистых сред, приближенно описывающих реальные геологические ситуации. По результатам проведенных численных экспериментов с использованием четырех рассмотренных в работе алгоритмов кинематической миграции были сделаны выводы об эффективности применения каждого из алгоритмов для восстановления геологических границ в моделях сред различной сложности.

Ключевые слова: обратная кинематическая задача, лучевое трассирование, сейсмический луч, неоднородные среды, лучевая миграция, градиент скорости

Для цитирования: Степанов П.Ю., Гоманюк Ю.А. Алгоритмы глубинной кинематической миграции в двумерных средах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 6. С. 114–129.

ALGORITHMS OF DEEP KINEMATIC MIGRATION IN TWO-DIMENSIONAL MEDIA

Pavel Yu. Stepanov¹, Julia A. Gomanuk²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; seismic310@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8131-8998>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; juliagmn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1253-4689>

Abstract. The paper considers four kinematic migration algorithms (procedures for converting the arrival times of reflected waves to the Earth's surface into the depths of the reflecting boundaries) using medium-velocity and reservoir velocity models of layered media: a standard algorithm for converting times to depths through average velocities; a modified medium-velocity algorithm that takes into account the slope of seismic boundaries; an algorithm for layer-by-layer recalculation of t_0 lines to depths; a variational kinematic migration algorithm based on the theory of ray tracing by integrating a system of differential equations with specified initial conditions by the Runge–Kutta method. To study the possibilities and limitations of each of the algorithms, calculations were carried out on a number of theoretical models of layered media that approximate real geological situations. Based on the results of numerical experiments using the four kinematic migration algorithms considered in the paper, conclusions were drawn about the effectiveness of using each of the algorithms to restore geological boundaries in media models of varying complexity.

Keywords: inverse kinematic problem, ray tracing, seismic ray, inhomogeneous media, ray migration, velocity gradient

For citation: Stepanov P.Yu., Gomanuk Ju.A. Algorithms of deep kinematic migration in two-dimensional media. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 6: 114–129. (In Russ.).

Введение. В самых общих терминах под кинематической миграцией понимают задачу определения конфигурации отражающих границ по полю времен прихода отраженных волн, которая играет центральную роль в сейсмическом методе разведки, поскольку конечной целью детальной сейсморазведки МОВ является передача объекта под буре-

ние, что предполагает указание его расположения в пространстве [Глоговский, 1989]. Часто понятие «кинематическая миграция» заменяют на «лучевую миграцию», которая предполагает преобразование временных разрезов в глубинные посредством лучевого трассирования. Лучевое трассирование является одним из основных подходов к решению

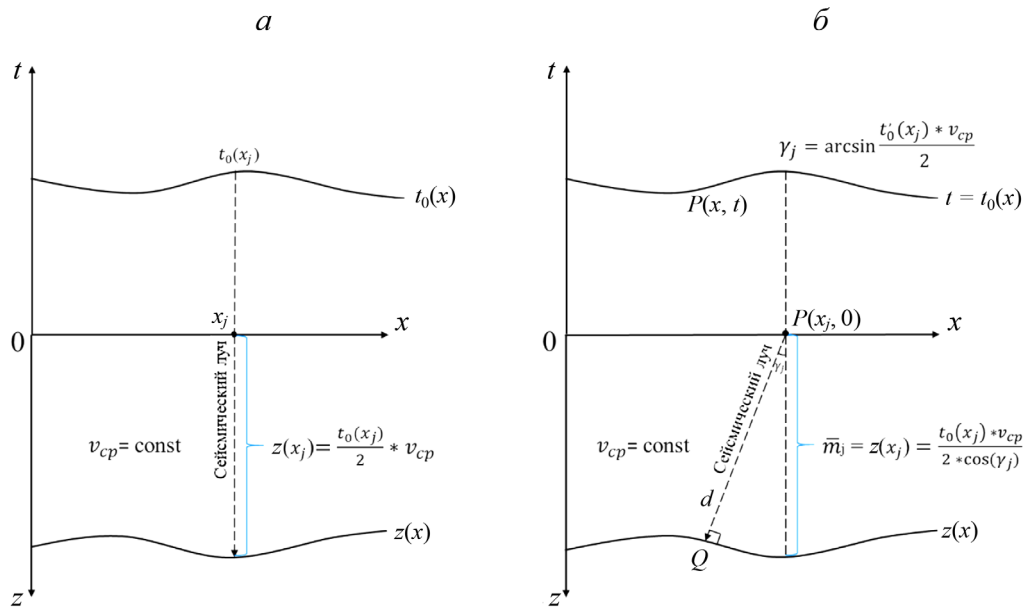


Рис. 1. Лучевые схемы к среднескоростным алгоритмам: а — среднескоростной алгоритм (алгоритм 1), б — модифицированный среднескоростной алгоритм (алгоритм 2)

кинематических задач сейсморазведки, поскольку прослеживание сейсмических лучей волн разных типов позволяет детально изучить характер распространения упругих волн в сложнопостроенных средах [Cerveny, 2001; Rawlinson и др., 2007]. Однако такая общая формулировка не позволяет судить о существовании решения обратной задачи, его единственности, а также разработать конструктивные методы нахождения решения. Поэтому при «математической постановке» обратной кинематической задачи вводится ряд предположений относительно строения среды [Степанов, 2000].

Первое из предположений состоит в том, что информация о глубинном строении среды может быть получена по временам прихода волн, отраженных от сравнительно небольшого количества границ. Подобный подход позволяет существенно упростить методы решения обратной кинематической задачи. Второе предположение касается параметризации скоростных и глубинных характеристик выделенных слоев. В большинстве известных алгоритмов решения обратной кинематической задачи предполагается, что интервальная скорость локально постоянна в пределах объема среды, формирующего один или несколько соседних годографов. Таким образом, одно только требование об однородности слоя сразу делает обратную кинематическую задачу определенной. Вместе с тем ясно, что в этом случае решение строится в модели, которая может быть не адекватна реальной среде [Глоговский, Лангман, 2009; Глоговский, 2011].

В настоящей работе рассмотрены четыре алгоритма преобразования времен в глубины, использующие среднескоростную и пластовую скоростные модели слоистых сред:

- стандартный алгоритм пересчета времен в глубины через средние скорости на основе регрессионных зависимостей $H(t_0)$, полученных по скважинным данным (с точки зрения сейсмической теории это означает, что используются прямолинейные вертикальные сейсмические лучи, распространяющиеся в фиктивной однородной среде);

- модифицированный среднескоростной алгоритм, учитывающий наклон сейсмических границ;

- алгоритм послойного пересчета линий t_0 в глубины для слоистых сред с криволинейными границами и локально постоянными в окрестности точки наблюдения пластовыми скоростями;

- вариационный алгоритм кинематической миграции, основанный на вариационной теории лучевого трассирования, разработанной профессором кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ Т.И. Облогиной [Облогина, 1998]. Данный алгоритм используется для наиболее общей модели двумерной среды, представляющей собой слоистую толщу с переменными пластовыми скоростями, и учитывает искривление сейсмических лучей в слоях, вызванное неоднородностью среды, преломление лучей на промежуточных границах, а также наклон сейсмических границ.

Целью работы являлось изучение возможностей и ограничений различных алгоритмов кинематической миграции при восстановлении сейсмических границ в слоистых двумерных средах.

Алгоритмы кинематической миграции. Стандартный алгоритм кинематической миграции для среднескоростной модели среды (алгоритм 1). В современной сейсмической практике при проведении структурных построений по целевым отражающим горизонтам во всех производственных организаци-

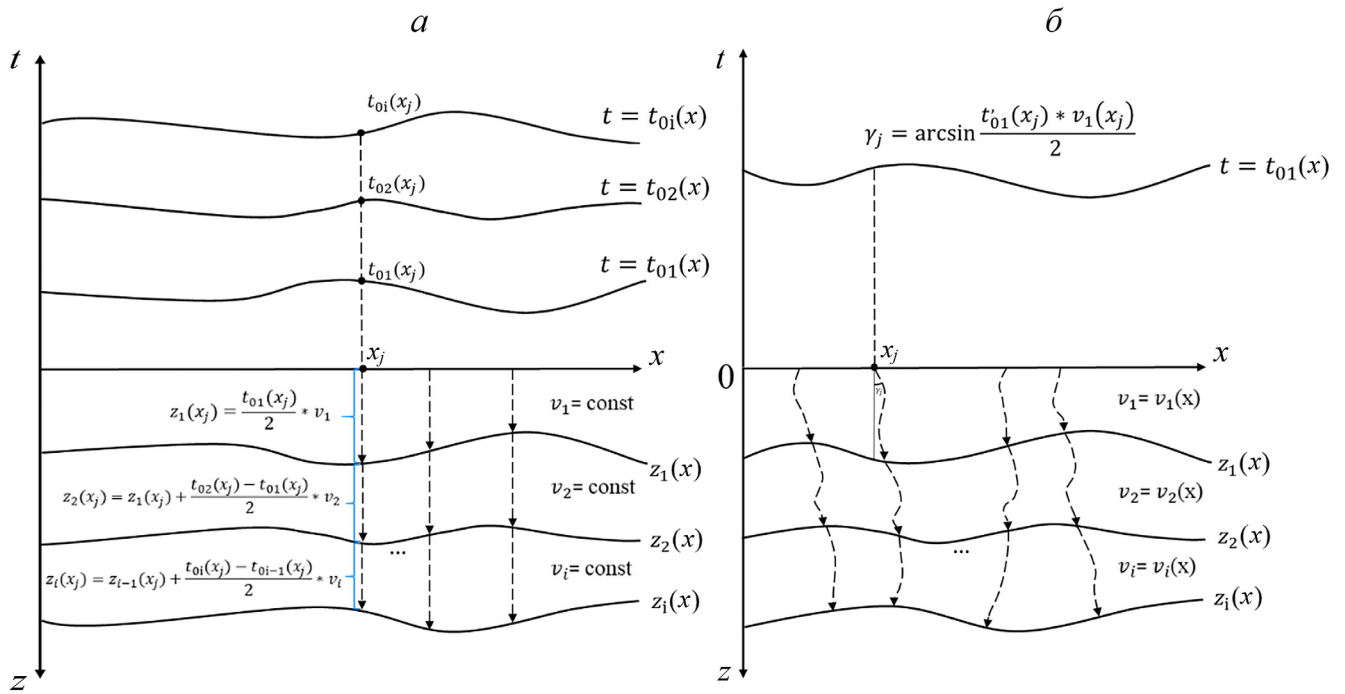


Рис. 2. Лучевые схемы к послойным алгоритмам: а — алгоритм послойного пересчета (алгоритм 3), б — вариационный алгоритм (алгоритм 4)

ях используется стандартный алгоритм пересчета времен в глубины через средние скорости на основе регрессионных зависимостей $H(t_0)$, полученных по скважинным данным (вертикальные годографы вертикального сейсмического профилирования или результаты привязки сейсмических данных к данным акустического каротажа). С точки зрения сейсмической теории это означает, что используются прямолинейные вертикальные сейсмические лучи, распространяющиеся в фиктивной однородной среде (рис. 1, а). При этом предполагается, что средние скорости локально постоянны в окрестности точки наблюдения. Другими словами, средние скорости сейсмических волн могут меняться вдоль линии профиля (от скважины к скважине), но при проведении вычислений предполагается, что скорость в данной области есть константа, а сейсмические лучи идут вдоль вертикальных прямых. Данный простейший среднескоростной алгоритм, естественно, не предполагает учет кривизны сейсмических лучей и их преломления на промежуточных границах.

Алгоритм кинематической миграции для среднескоростной модели среды, учитывающий наклон границ (алгоритм 2). Идея, лежащая в основе алгоритма, была предложена Т.И. Облогиной для простейшей модели трехмерной среды, представляющей собой однородную среду с плоской наклонной отражающей границей [Облогина, Степанов, 2003]. Данный алгоритм был адаптирован авторами для работы с двумерно-неоднородными средами с криволинейными отражающими границами. В отличие от стандартного среднескоростного алгоритма, рассматриваемый метод перевода времен в глубины вы-

числяет угол выхода сейсмического луча на земную поверхность, при этом он так же, как и алгоритм 1, предполагает, что среда выше отражающей границы является фиктивно однородной.

Обратная кинематическая задача в этом случае заключается в нахождении положения отражающей границы в пространстве при заданном ее временном изображении $t = t(x)$ и известной средней скорости v (рис. 1, б). Задача сводится к нахождению точек Q на отражающей границе, соответствующих точкам P, принадлежащим временному изображению $t = t(x)$. Обращаясь к рис. 1, б, будем искать решение задачи для точки $P(x, 0)$, принадлежащей плоскости $t = 0$, или, что то же самое, плоскости $z = 0$. Задача сводится теперь к нахождению вертикальной мощности слоя \bar{m} в точке $P(x, 0)$. Из рис. 2 следует, что

$$d = \bar{m} \cos \gamma. \tag{1}$$

Время пробега волны вдоль луча будет равно

$$\frac{1}{2}t = \frac{\bar{m} \cos \gamma}{v}, \tag{2}$$

а отсюда

$$\bar{m} = \frac{vt}{2 \cos \gamma}. \tag{3}$$

Угол падения границы можно найти следующим образом:

$$\gamma = \arcsin \frac{v}{2} t'_x. \tag{4}$$

Формулы решения обратной задачи были получены для среды с плоской наклонной отражающей границей. Отметим, что гладкую криволинейную отражающую границу $z(x)$ можно рассматривать как огибающую семейства касательных к этой границе в точках x, z . Для восстановления отражающей границы достаточно определить вертикальные глубины залегания границы \bar{m}_{ij} в точках $P(x_p, 0)$, являющихся точками выхода нормальных к искомой границе лучей на дневную поверхность. Для этого нужно воспользоваться установленными выше зависимостями между значениями $t = t(x)$, известными по наблюденному временному изображению и искомым параметром \bar{m}_i [Облогина, Степанов, 2003].

Алгоритм кинематической миграции для слоистых сред с локально-постоянными пластовыми скоростями (алгоритм 3). Для слоистых сред с криволинейными границами и постоянными скоростями в слоях часто используется алгоритм послойного пересчета линий t_0 в глубины. Используются прямолинейные вертикальные сейсмические лучи, распространяющиеся в слоях, в предположении, что пластовые скорости локально постоянны в окрестности точки наблюдения. Другими словами, скорости сейсмических волн могут меняться вдоль горизонтов, для каждой точки на земной поверхности они могут различаться, но при проведении вычислений предполагается, что скорость в данной области есть константа, а сейсмические лучи идут вдоль вертикальных прямых. Данный алгоритм предполагает послойное последовательное применение стандартного среднескоростного алгоритма к временному изображению каждой границы начиная с поверхности земли (линии $x=0$). На каждом новом шаге расчетов определенная на предыдущем этапе граница становится новой поверхностью наблюдений. Алгоритм не предполагает учет кривизны сейсмических лучей и их преломления на промежуточных границах (рис. 2, а).

Вариационный алгоритм кинематической миграции для слоистых сред с горизонтальным градиентом скорости (алгоритм 4). Для наиболее общей модели двумерной среды, представляющей собой слоистую толщу с переменными пластовыми скоростями, при преобразовании временных изображений в глубинные горизонты необходимо корректно учитывать как искривление сейсмических лучей в слоях, вызванное неоднородностью среды, так и преломление лучей на промежуточных границах.

Задача построения по данным МОГТ отражающих границ в слоистых средах с пластовыми скоростями, изменяющимися вдоль каждого из пластов по произвольному закону, может быть сформулирована следующим образом. В точках $(x, 0)$, произвольно расположенных вдоль линии профиля, заданы времена $t_{0i}(x)$, а также величины пластовых скоростей, найденные по скважинным данным и результатам скоростного анализа сейсмограмм МОГТ. Пластовые

скорости определены на вертикальных полупрямых в нижнем полупространстве $z > 0$, исходящих из произвольно расположенных точек на линии профиля. Данная пластовая скоростная модель наиболее распространена на практике. При этом следует отметить, что для расчета сейсмических лучей с использованием вариационного алгоритма факт наличия или отсутствия вертикального градиента скорости в пластах не имеет принципиального значения, поскольку используемый алгоритм позволяет работать с любыми типами неоднородных сред (Степанов, Гоманюк, 2022). Требуется восстановить отражающие границы, соответствующие зависимостям $t_{0i}(x)$ с учетом преломления лучей на вышележащих границах (рис. 2, б).

Данная задача может быть сформулирована как задача интегрирования системы дифференциальных уравнений лучей для двумерной среды [Ермаков, Степанов, 2018].

Первые два уравнения этой системы определяют пространственные траектории лучей, третье — угол падения луча. Требуется определить начальные условия для всех неизвестных функций в системе уравнений лучей, затем найти решение задачи Коши и определить из этого решения значения x, z , отвечающие значению $\tau = t_0/2$, где t_0 — временное изображение отражающей поверхности. Геометрическое место найденных точек отражения представляет собой искомую отражающую границу. Интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка осуществляется методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

Рассмотренные выше алгоритмы кинематической миграции были реализованы в виде программного обеспечения на языке C++, после чего были проведены расчеты на теоретических данных и полевом материале, которые позволили сделать выводы о применимости данных алгоритмов для восстановления геологических границ в средах различной сложности.

Кратко особенности каждого из рассмотренных алгоритмов кинематической миграции приведены в таблице.

Исследование возможностей и ограничений различных алгоритмов кинематической миграции на теоретических моделях. Для исследования возможностей и ограничений каждого из четырех алгоритмов решения обратной кинематической задачи были проведены расчеты на ряде теоретических моделей слоистых сред, приближенно описывающих реальные геологические ситуации. Каждая математическая модель состояла из пяти слоев. Скорость в слоях принималась постоянной или переменной по горизонтальной оси. Вертикальный градиент скорости в слоях отсутствовал, поскольку на практике при формировании пластовой скоростной модели среды часто используются данные скоростного анализа и скважинные данные, предполагающие определение пластовых скоростей в виде ступенчатых функций

Особенности рассмотренных алгоритмов кинематической миграции

	Алгоритм	Тип скоростей	Учет сейсмического сноса	Способ определения начального угла выхода луча
1	Стандартный алгоритм кинематической миграции для среднескоростной модели среды	средние скорости	без учета сейсмического сноса	луч, нормальный к земной поверхности
2	Алгоритм кинематической миграции для среднескоростной модели среды, учитывающий наклон границ	средние скорости	с учетом сейсмического сноса	через dt_j/dx (угол наклона j -й границы) и средние скорости до j -й границы
3	Алгоритм кинематической миграции для слоистых сред с локально-постоянными пластовыми скоростями	интервальные (пластовые) скорости	без учета сейсмического сноса	луч, нормальный к земной поверхности
4	Вариационный алгоритм кинематической миграции для слоистых сред с горизонтальным градиентом скорости	интервальные (пластовые) скорости	с учетом сейсмического сноса	через $dt_{(1)}/dx$ и V_1 : угол наклона первой границы, скорости в первом слое

с постоянной в пределах каждого пласта вертикальной составляющей скорости.

Для каждой модели была решена прямая кинематическая задача с использованием вариационного алгоритма лучевого трассирования, то есть были рассчитаны линии $t_0(x)$ для каждой отражающей границы [Степанов, Гоманюк, 2022]. При расчетах от каждой отражающей границы с постоянным шагом по координате x выпускались лучи под углом 90° к границе (нормальные лучи). Далее эти лучи прослеживались до земной поверхности с учетом искривления, вызванного скоростными неоднородностями в слоях, и преломления на вышележащих границах.

При проведении численных экспериментов по полученным в результате решения прямой кинематической задачи 2D временным изображениям границ (линиям t_0) решалась обратная кинематическая задача по четырем рассмотренным в работе алгоритмам кинематической миграции и проводилось сравнение исходной модели и восстановленных глубинных границ. На основании полученных результатов были сделаны выводы об эффективности применения каждого из алгоритмов кинематической миграции для восстановления геологических границ в моделях сред различной сложности.

Для расчетов использовались теоретические модели размером 3 км вдоль профиля и 3 км в глубину. Шаг пунктов возбуждения был выбран равным 50 м. При решении обратной задачи с использованием вариационного алгоритма (алгоритма 4) интегрирование системы дифференциальных уравнений лучей проводилось с шагом по времени 1 мс.

Модель 1. Горизонтально-слоистая среда с постоянными пластовыми скоростями. Данная модель весьма распространена на практике, так как зачастую достаточно точно описывает геологическое строение осадочного чехла Земли. Границы в модели находились на глубинах 500, 1000, 1500, 2000, 2500 м; скорости в слоях были заданы 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 м/с, соответственно (рис. 3, а). Представле-

но решение прямой кинематической задачи для данной модели среды. Зеленым цветом показаны модельные глубинные границы, голубым — нормальные сейсмические лучи (исходящие под углом 90° к границе), прослеженные от нижней границы до земной поверхности. Справа показан результат решения прямой кинематической задачи (линии t_0) для каждой из пяти границ (рис. 3, б).

На рис. 3, в–е представлен результат решения обратной кинематической задачи по четырем используемым в работе алгоритмам для данной модели среды. Красным цветом показаны восстановленные различными алгоритмами кинематической миграции глубинные границы, зеленым — исходные модельные границы. Голубым цветом показаны сейсмические лучи, прослеженные от земной поверхности до нижней границы (для алгоритма 4) или условные вертикальные линии (аналоги лучей), вдоль которых проводился расчет обратной задачи (для алгоритмов 1–3).

В данном случае исходные и восстановленные границы полностью совпадают для всех четырех алгоритмов, поэтому исходные границы не видны под восстановленными границами при решении обратной задачи. Невязки для данной модели по всем четырем алгоритмам составляют от 0 м для первой границы до 1,5–3 м для пятой границы. Наличие небольшой невязки связано с алгоритмическими погрешностями расчетов и накоплением ошибки при прослеживании луча до глубин в несколько километров. Такие неточности на практике нивелируются путем «подсадки» полученных глубинных границ на скважинные отбивки.

Модель 2. Горизонтально-слоистая среда с горизонтальным градиентом скорости в слоях. Модель 2 получена из предыдущей модели путем добавления во все слои горизонтального градиента скорости, равного 150 м/с на 1 км расстояния вдоль профиля (рис. 4, а). Все остальные параметры модели 1 оставлены без изменения. На рис. 4, а представлено решение прямой кинематической задачи

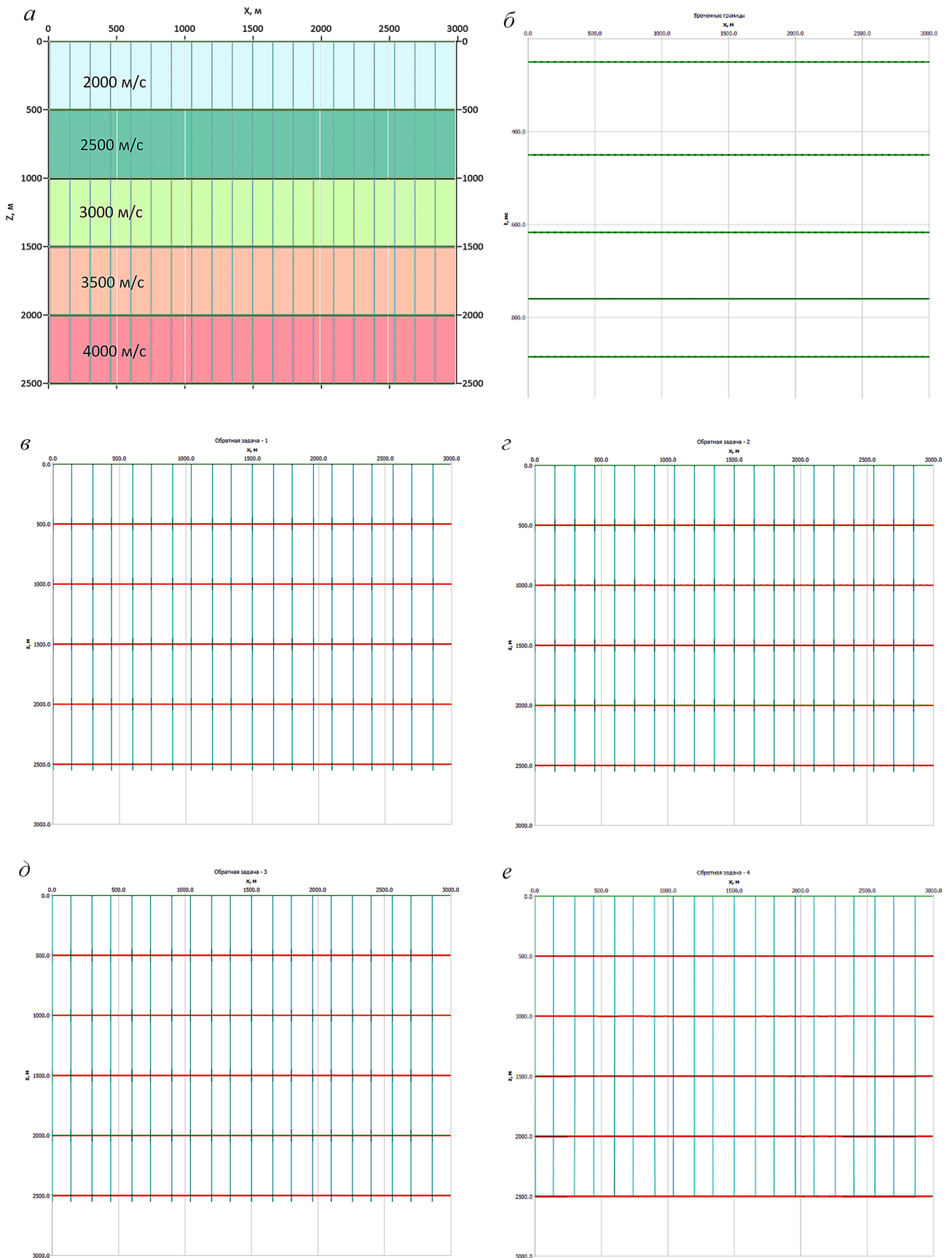


Рис. 3. а — Модель 1 и решение прямой задачи для нее, б — линии t_0 для модели 1. Результаты восстановления отражающих границ различными алгоритмами кинематической миграции для модели 1: в — среднескоростной алгоритм (алгоритм 1), г — модифицированный среднескоростной алгоритм (алгоритм 2), д — алгоритм послыоного пересчета (алгоритм 3), е — вариационный алгоритм (алгоритм 4). Голубым цветом показаны лучевые траектории для пятой границы, красным — результат решения обратной задачи (границы в глубинном масштабе), зеленым — исходные модельные границы

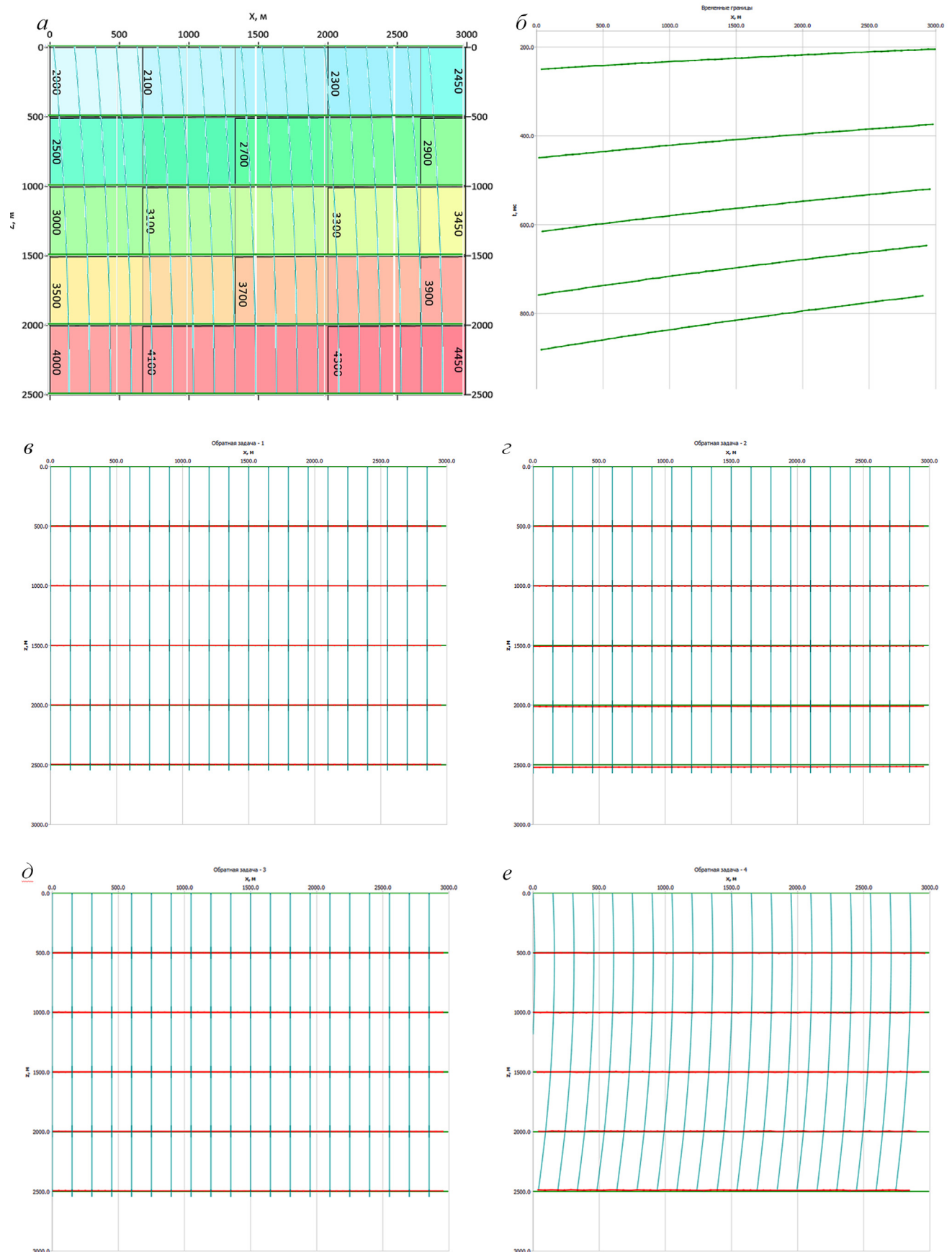


Рис. 4. *a* — Модель 2 и решение прямой задачи для нее, *б* — линии t_0 для модели 2. Результаты восстановления отражающих границ различными алгоритмами кинематической миграции для модели 2: *в* — среднескоростной алгоритм (алгоритм 1), *г* — модифицированный среднескоростной алгоритм (алгоритм 2), *д* — алгоритм послыюного пересчета (алгоритм 3), *е* — вариационный алгоритм (алгоритм 4). Голубым цветом показаны лучевые траектории для пятой границы, красным — результат решения обратной задачи (границы в глубинном масштабе), зеленым — исходные модельные границы

для данной модели среды. Справа на рис. 4, б показан результат решения прямой кинематической задачи (линии t_0) для каждой из пяти границ. Заметно небольшое искривление лучей вследствие наличия горизонтального градиента скорости в слоях.

На рис. 4, в–е представлен результат решения обратной кинематической задачи по четырем используемым в работе алгоритмам для данной модели среды. В данном случае исходные и восстановленные границы полностью совпадают для алгоритмов 1 и 3 (рис. 4, в, д) и практически полностью совпадают для алгоритма 4 (рис. 4, е). Наихудший результат наблюдается для алгоритма 2 (рис. 4, б). Невязки по алгоритмам 1 и 3 составляют от 1–2 до 5 м, по алгоритму 4 — до 10 м, по алгоритму 2 — до 15–20 м. Большие невязки наблюдаются для более глубоких границ, поэтому здесь и далее невязки указаны для нижней границы.

В данном случае алгоритм 2 сработал не вполне корректно, что объясняется наклоном временных изображений границ (рис. 4, б), вызванным наличием горизонтального градиента скорости, поскольку модифицированный среднескоростной алгоритм определяет начальный угол выхода луча как производную линии t_0 . Таким образом, можно сделать вывод, что данный алгоритм будет заведомо некорректно восстанавливать границы при наличии значительного скоростного градиента в слоях, вызывающего искривление лучей и временных изображений границ, которое ошибочно воспринимается как наклон границ, что не соответствует действительности.

Модель 3. Наклонно-слоистая среда с наклоном границ 3° . Модель 3 относится к другому распространенному на практике типу геологических сред — наклонно-слоистым средам с небольшим (до $7\text{--}10^\circ$) наклоном слоев. В данной модели (рис. 5, а) наклон слоев составляет 3° , что соответствует изменению глубины границы примерно 50 м на 1 км расстояния вдоль профиля. Скорости в слоях постоянны и составляют 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 м/с. Представлено решение прямой кинематической задачи для данной модели среды. Справа показаны линии t_0 , рассчитанные для каждой из пяти границ (рис. 5, б).

На рис. 5, в–е представлен результат решения обратной кинематической задачи различными алгоритмами. В данном случае исходные и восстановленные границы совпадают с точностью до 1–2 м для алгоритма 4, чуть худшие результаты наблюдаются для алгоритмов 1–3. Невязки составляют от 2–3 до 5 м (рис. 5, в–е). То есть малые углы наклона границ практически не сказываются на результатах работы как среднескоростных алгоритмов, так и послойного и вариационного алгоритмов кинематической миграции.

Модель 4. Наклонно-слоистая среда с наклоном границ 10° . Рассмотрим аналогичную модель с наклоном слоев 10° , что соответствует изменению глубины границы примерно 165 м на 1 км расстояния

вдоль профиля. Скорости в слоях постоянны и составляют 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 м/с (рис. 6, а). Представлено решение прямой кинематической задачи для данной модели среды (рис. 6, а), а на рис. 6, б — результат решения обратной кинематической задачи по четырем используемым в работе алгоритмам для данной модели среды.

Как можно видеть, корректный результат кинематической миграции получен только для вариационного алгоритма (алгоритм 4) (рис. 6, е). Алгоритмы 1 и 3 восстановили положение отражающих границ некорректно, так как они предполагают расчет обратной задачи вдоль вертикальных прямых, в то время как для данной модели при расчете прямой задачи лучи существенно отклоняются от вертикали (рис. 6, в, д). Среднескоростной алгоритм, учитывающий наклон сейсмических лучей (алгоритм 2), сработал эффективнее алгоритмов, работающих с вертикальными лучами, однако это относится только к верхним трем границам (рис. 6, з). Более глубоко залегающие границы восстановились с заметной погрешностью, что объясняется, по видимому, накоплением вычислительных ошибок для нижних границ.

Модель 5. Среда с антиклинальными границами и постоянными пластовыми скоростями. Модель 5 представляет собой модель среды с антиклинальной складкой. Максимальная амплитуда в центральной части складки составляет 200 м для нижней границы. Вверх по разрезу складка выполаживается, для верхней границы амплитуда складки составляет 100 м. Такая ситуация характерна, например, для областей с развитием солянокупольной тектоники. Скорости в слоях модели постоянны и составляют 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 м/с (рис. 7, а). Представлено решение прямой кинематической задачи для данной модели среды. Справа показаны линии t_0 , рассчитанные для каждой из пяти границ (рис. 7, б).

На рис. 7, в–е представлен результат решения обратной кинематической задачи по четырем используемым в работе алгоритмам для данной модели среды. Видно, что лучший результат решения обратной задачи в данном случае получен для алгоритма 4 (невязки до 8 м), а худший — для алгоритма 3 (невязки до 45 м). Такой результат объясняется конфигурацией границ в модели, которая обеспечивает сходство прямого и обратного лучей для алгоритма 4 и их различие для алгоритмов 1 и 3 (рис. 7, в, д, е). Достаточно корректный результат позволяет получить и алгоритм 2, который учитывает наклон границ (рис. 7, з). Следует еще раз подчеркнуть, что параллельность границ, то есть унаследование нижними границами формы верхних горизонтов, является залогом успеха применимости алгоритмов кинематической миграции, вычисляющих стартовый угол выхода лучей по наклону границ. А вот кривизна границ в алгоритмах, предполагающих использова-

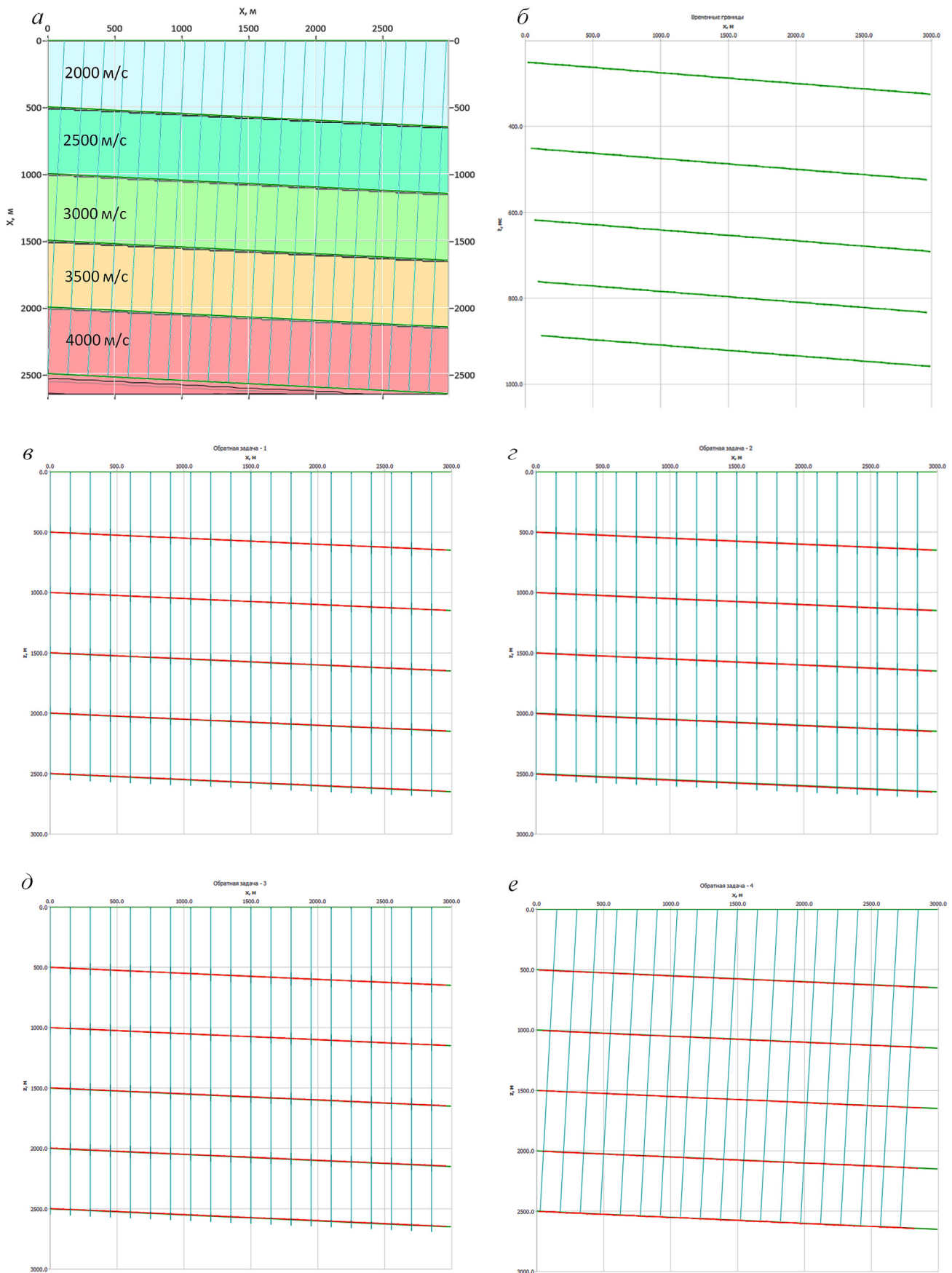


Рис. 5. *a* — Модель 3 и решение прямой задачи для нее, *б* — линии t_0 для модели 3. Результаты восстановления отражающих границ различными алгоритмами кинематической миграции для модели 3: *в* — среднескоростной алгоритм (алгоритм 1), *г* — модифицированный среднескоростной алгоритм (алгоритм 2), *д* — алгоритм послойного пересчета (алгоритм 3), *е* — вариационный алгоритм (алгоритм 4). Голубым цветом показаны лучевые траектории для пятой границы, красным — результат решения обратной задачи (границы в глубинном масштабе), зеленым — исходные модельные границы

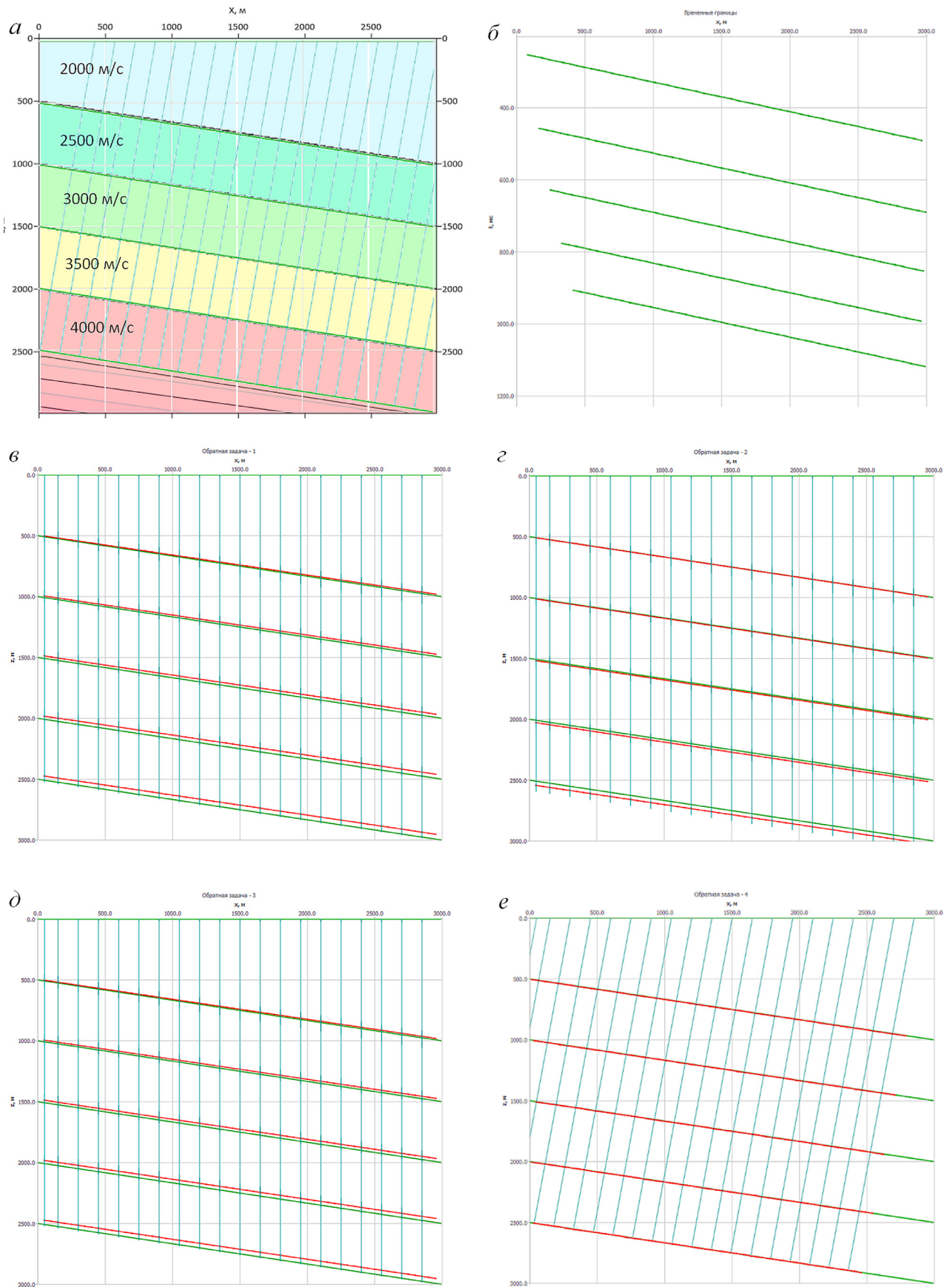


Рис. 6. а — Модель 4 и решение прямой задачи для нее, б — линии t_0 для модели 4. Результаты восстановления отражающих границ различными алгоритмами кинематической миграции для модели 4: в — среднескоростной алгоритм (алгоритм 1), з — модифицированный среднескоростной алгоритм (алгоритм 2), д — алгоритм послойного пересчета (алгоритм 3), е — вариационный алгоритм (алгоритм 4). Голубым цветом показаны лучевые траектории для пятой границы, красным — результат решения обратной задачи (границы в глубинном масштабе), зеленым — исходные модельные границы

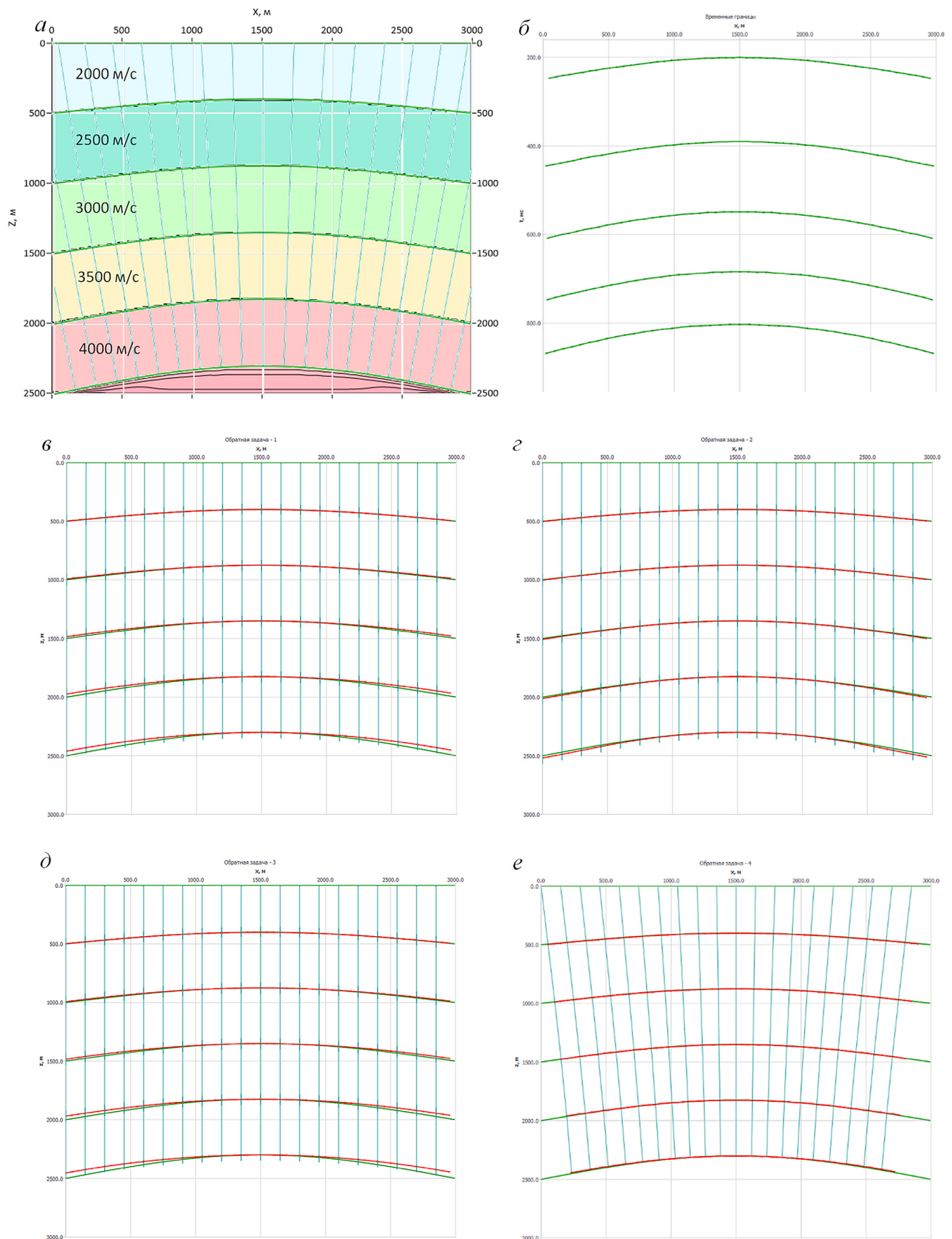


Рис. 7. *a* — Модель 5 и решение прямой задачи для нее, *б* — линии t_0 для модели 5. Результаты восстановления отражающих границ различными алгоритмами кинематической миграции для модели 5: *в* — среднескоростной алгоритм (алгоритм 1), *г* — модифицированный среднескоростной алгоритм (алгоритм 2), *д* — алгоритм послыного пересчета (алгоритм 3), *е* — вариационный алгоритм (алгоритм 4). Голубым цветом показаны лучевые траектории для пятой границы, красным — результат решения обратной задачи (границы в глубинном масштабе), зеленым — исходные модельные границы

ние вертикальных лучей, существенно лимитирует точность решения обратной задачи (рис. 7, в, д).

Модель 6. Среда с антиклинальной складкой и горизонтальной верхней границей. Исследуем, насколько изменятся результаты расчетов в случае, если одна или несколько границ в антиклинальной модели станут горизонтальными. Для начала рассмотрим модель с горизонтальной верхней границей (рис. 8, а). Все остальные параметры модели совпадают с параметрами модели 5: максимальная амплитуда в центральной части складки для нижней границы составляет 200 м, скорости в слоях модели постоянны и составляют 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 м/с.

На рис. 8, а представлено решение прямой кинематической задачи для данной модели среды. Справа на рис. 8, б показан результат решения прямой кинематической задачи (линии t_0) для каждой из пяти границ.

На рис. 8, в–е представлен результат решения обратной кинематической задачи по четырем используемым в работе алгоритмам для данной модели среды. Можно видеть, что достаточно незначительное изменение модели среды приводит к значительным изменениям результатов восстановления границ различными алгоритмами кинематической миграции (рис. 8, в–е). Практически идеальный результат в данном случае позволяет получить алгоритм 2 (рис. 8, з), а худший результат, в отличие от предыдущих моделей, показывает алгоритм 4, что можно объяснить тем, что стартовый угол выхода лучей при решении обратной задачи определяется по наклону временного изображения первой границы, которая в данной модели параллельна земной поверхности (рис. 8, а, е). Невязки по алгоритму 2 для нижней границы не превышают 10 м, по алгоритмам 1 и 3 — 50 м, по алгоритму 4 — 60 м. То есть корректный результат позволяет получить только алгоритм 2, что наводит на мысль о необходимости комбинирования алгоритмов 2 и 4 для получения лучшего результата для всех моделей сред.

Модель 7. Горизонтально-слоистая среда с антиклинальной верхней границей. Рассмотрим теперь влияние формы верхней границы на результат решения обратной кинематической задачи различными алгоритмами. Исследуем горизонтально-слоистую модель с антиклинальной верхней границей (рис. 9, а). Амплитуда антиклинальной границы в центральной ее части составляет 100 м. Скорости в слоях модели постоянны и составляют 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 м/с.

На рис. 9, а представлено решение прямой кинематической задачи для данной модели среды. Справа на рис. 9, б показан результат решения прямой кинематической задачи (линии t_0) для каждой из пяти границ.

На рис. 9, в–е представлен результат решения обратной кинематической задачи по четырем используемым в работе алгоритмам для данной модели среды. Данная модель интересна тем, что из-за

конфигурации границ лучи в прямой задаче идут практически вертикально (со слабым преломлением на границах), а вот в обратной задаче для алгоритма 4 форма первой границы определяет существенное отклонение луча от вертикали, что и приводит к ошибке восстановления формы границ (невязка составляет до 20 м) (рис. 9, е). В то время как три других алгоритма, не учитывающих при восстановлении ниже лежащих границ форму первой границы, позволяют получить корректный результат кинематической миграции для данной модели (рис. 9, в–д).

Модель 8. Среда с синклиналиными границами и постоянными пластовыми скоростями. Рассмотрим модель среды с синклиналиной складкой (рис. 10, а). Максимальная амплитуда в центральной части складки составляет 200 м для нижней границы. Вверх по разрезу складка выполаживается, для верхней границы амплитуда складки составляет 100 м. Скорости в слоях модели постоянны и составляют 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 м/с.

На рис. 10, а представлено решение прямой кинематической задачи для данной модели среды. Справа на рис. 10, б показан результат решения прямой кинематической задачи (линии t_0) для каждой из пяти границ.

На рис. 10, в–е представлен результат решения обратной кинематической задачи по четырем используемым в работе алгоритмам для данной модели среды. Результаты решения обратной кинематической задачи для синклиналиной складки аналогичны результатам для антиклинальной складки: достаточно корректный учет сейсмического сноса и прослеживание луча в вариационном алгоритме позволяют наиболее корректно восстановить форму складки (рис. 10, е). В то время как остальные алгоритмы дают существенную ошибку: невязки по алгоритмам 1 и 3 составляют до 50 м, по алгоритму 2 — до 70 м. Некорректный результат, полученный по алгоритму 2 для нижней границы, объясняется неучетом преломления лучей и несоответствием среднескоростной модели среды реальному распределению скоростей (рис. 10, з).

Заключение. По результатам проведенных численных экспериментов с использованием четырех рассмотренных в работе алгоритмов кинематической миграции были сделаны выводы об эффективности применения каждого из алгоритмов для восстановления геологических границ в моделях сред различной сложности.

1. Если траектории восходящего (при решении прямой задачи) и нисходящего (при решении обратной задачи) лучей существенно не совпадают, то ни один из алгоритмов кинематической миграции не позволяет корректно восстановить форму и положение границ в среде.

2. Для горизонтально-слоистой среды с постоянными скоростями в слоях исходные и восстановленные границы полностью совпадают для всех рассмотренных алгоритмов, и использование

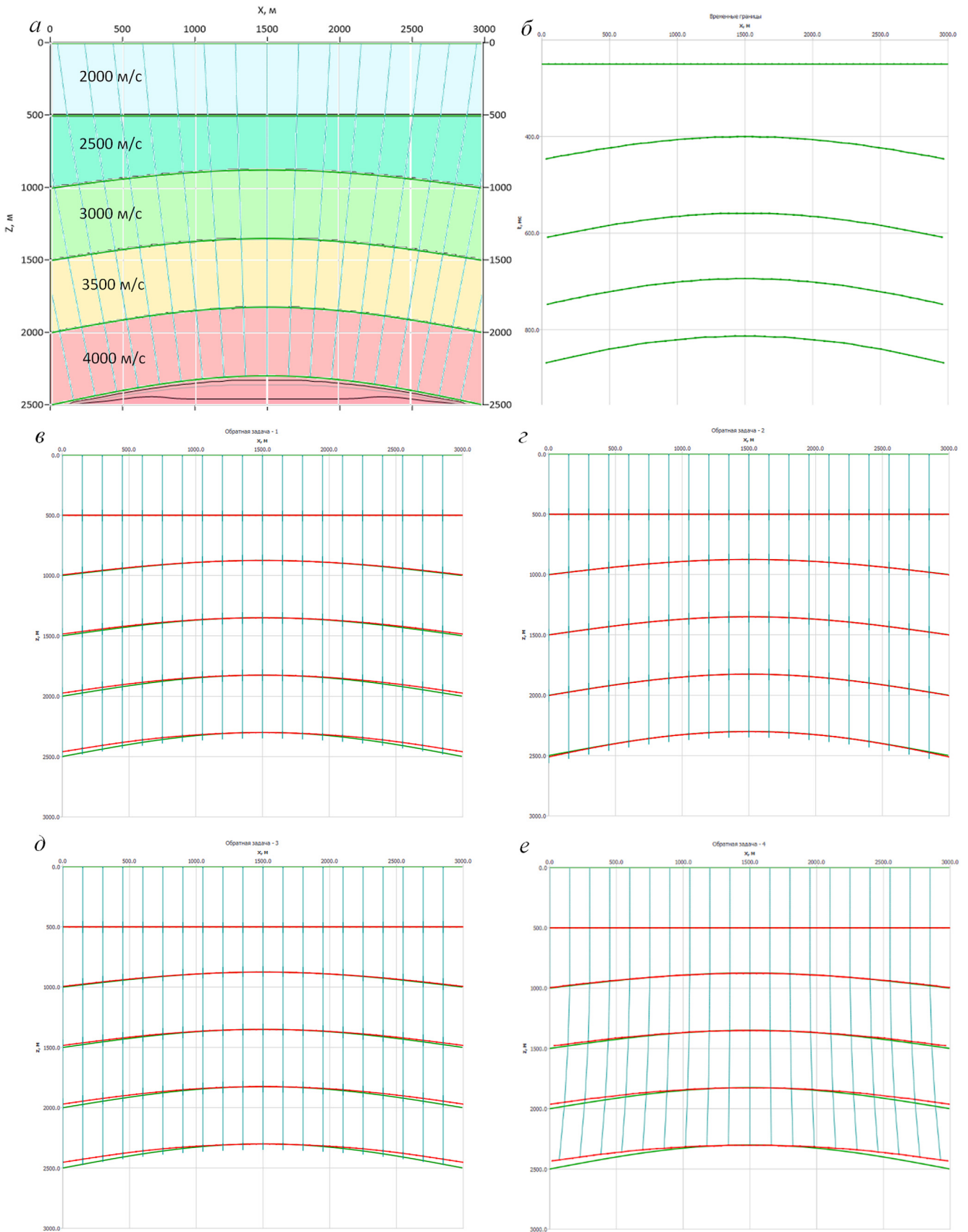


Рис. 8. *a* — Модель 6 и решение прямой задачи для нее, *б* — линии t_0 для модели 6. Результаты восстановления отражающих границ различными алгоритмами кинематической миграции для модели 6: *в* — среднескоростной алгоритм (алгоритм 1), *г* — модифицированный среднескоростной алгоритм (алгоритм 2), *д* — алгоритм послыюного пересчета (алгоритм 3), *е* — вариационный алгоритм (алгоритм 4). Голубым цветом показаны лучевые траектории для пятой границы, красным — результат решения обратной задачи (границы в глубинном масштабе), зеленым — исходные модельные границы

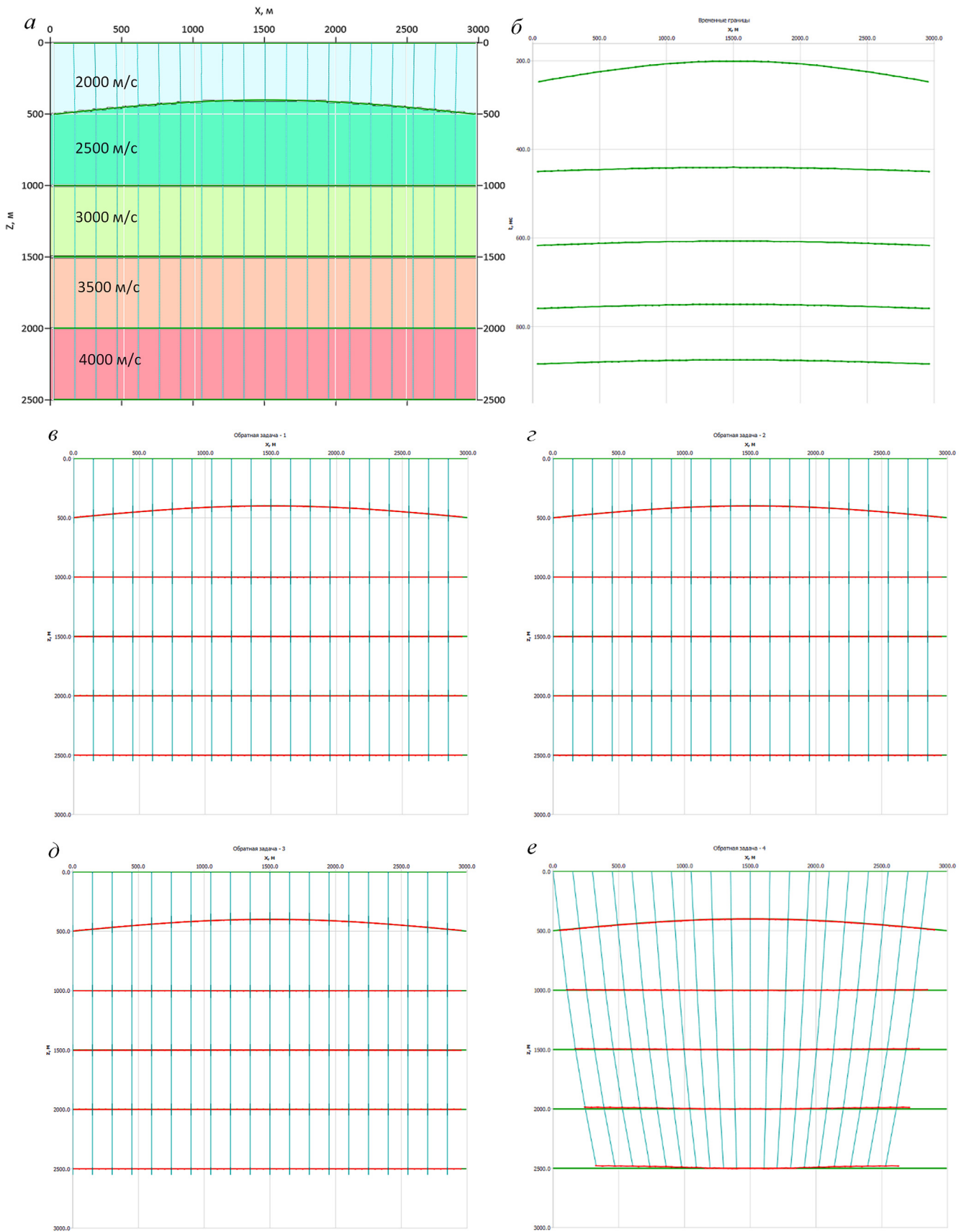


Рис. 9. *a* — Модель 7 и решение прямой задачи для нее, *б* — линии t_0 для модели 7. Результаты восстановления отражающих границ различными алгоритмами кинематической миграции для модели 7: *в* — среднескоростной алгоритм (алгоритм 1), *г* — модифицированный среднескоростной алгоритм (алгоритм 2), *д* — алгоритм послыюного пересчета (алгоритм 3), *е* — вариационный алгоритм (алгоритм 4). Голубым цветом показаны лучевые траектории для пятой границы, красным — результат решения обратной задачи (границы в глубинном масштабе), зеленым — исходные модельные границы

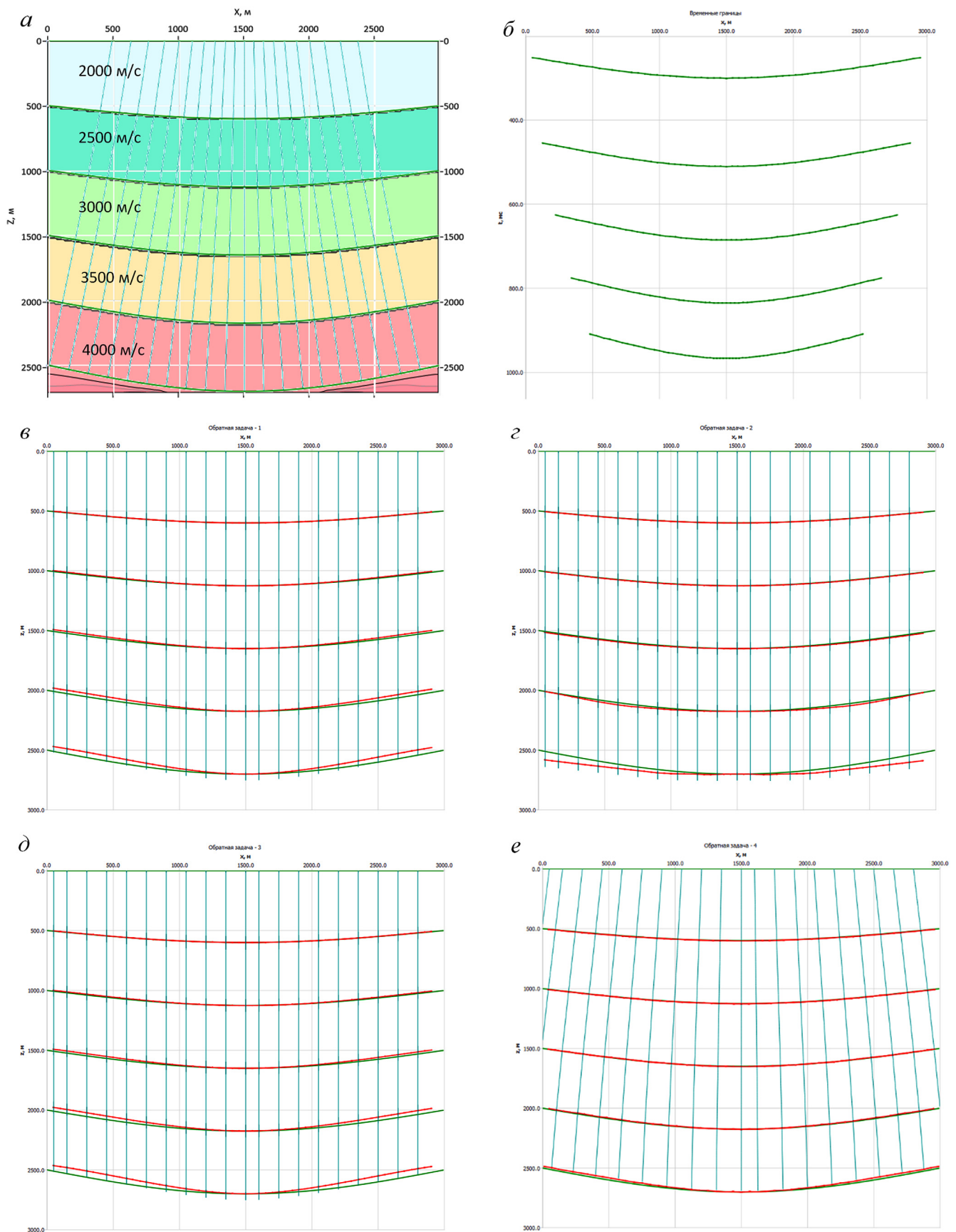


Рис. 10. *a* — Модель 8 и решение прямой задачи для нее, *б* — линии t_0 для модели 8. Результаты восстановления отражающих границ различными алгоритмами кинематической миграции для модели 8: *в* — среднескоростной алгоритм (алгоритм 1), *г* — модифицированный среднескоростной алгоритм (алгоритм 2), *д* — алгоритм послойного пересчета (алгоритм 3), *е* — вариационный алгоритм (алгоритм 4). Голубым цветом показаны лучевые траектории для пятой границы, красным — результат решения обратной задачи (границы в глубинном масштабе), зеленым — исходные модельные границы

сложных вариационных алгоритмов, требующих большого объема вычислений, нецелесообразно.

3. Восстановить истинный угол выхода луча на земную поверхность для корректного применения стандартных алгоритмов, предусматривающих дифференцирование линий t_0 , при значительном градиенте скорости в слоях не представляется возможным, поскольку формулы для определения стартового угла выхода луча предполагают постоянство скорости и, как следствие, прямолинейность лучей. Ошибки в определении стартового угла выхода лучей приводят к неэффективности этих алгоритмов.

4. В случае моноклинального залегания слоев хорошие результаты применения вариационного алгоритма и среднескоростного алгоритма, учитывающего наклон сейсмических границ, объясняются корректным определением угла выхода лучей, совпадением восходящих и нисходящих лучей, а также параллельностью границ.

5. Параллельность границ, то есть унаследованное нижними границами формы верхних горизонтов, является залогом успеха применимости алгоритмов кинематической миграции, вычисляющих стартовый угол выхода лучей по наклону первой границы: если нижние границы повторяют форму верхней, по наклону которой вариационный алгоритм определяет стартовый угол выхода лучей, то результаты кинематической миграции получаются достаточно точными, то есть алгоритм вполне корректно восстанавливает все глубинные горизонты.

6. Малые углы наклона границ (до 5°) практически не сказываются на результатах работы как среднескоростных алгоритмов, так и послойного и вариационного алгоритмов кинематической миграции.

7. При наклоне границ больше $6-7^\circ$ алгоритмы 1 и 3 восстанавливают положение отражающих

границ некорректно, так как данные алгоритмы предполагают расчет обратной задачи вдоль вертикальных прямых, в то время как при расчете прямой задачи лучи существенно отклоняются от вертикали. Алгоритм 4 напротив корректно восстанавливает наклонно-слоистые среды при любом наклоне границ.

8. Кривизна границ в алгоритмах, предполагающих использование вертикальных лучей (алгоритмы 1 и 3), существенно лимитирует точность решения обратной задачи.

9. При восстановлении складчатых структур обязательно применение алгоритмов кинематической миграции, учитывающих наклон границ (т. е. вычисляющих стартовый угол выхода сейсмических лучей по наклону границ при решении обратной кинематической задачи). Вариационный алгоритм решения обратной кинематической задачи (алгоритм 4) для моделей, содержащих складки, позволяет наиболее точно восстановить форму складки по сравнению с другими алгоритмами.

Таким образом каждый из рассмотренных алгоритмов кинематической миграции имеет свои достоинства и недостатки. Проанализировав все вышесказанное, можно предложить следующую методику структурных построений:

В случае, когда среда имеет простое горизонтально-слоистое или наклонно-слоистое (с углами наклона до $5-6^\circ$) строение, для проведения кинематической миграции данных достаточно использования классического среднескоростного или послойного алгоритмов (алгоритмов 1 и 3). В сложных сейсмогеологических условиях (среды с крутопадающими границами, осложненные протяженными складками различной формы и т. п.) рекомендуется применение алгоритмов кинематической миграции, учитывающих наклон отражающих границ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глоговский В.М. Прикладная теория определения скоростных и глубинных параметров среды по данным сейсморазведки МОВ: Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М., 1989. 33 с.

2. Глоговский В.М. Структурная устойчивость алгоритмов определения скоростных и глубинных параметров среды // Технологии сейсморазведки. 2011. № 4. С. 6–11.

3. Глоговский В.М., Лангман С.Л. Свойства решения обратной кинематической задачи сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. 2009. № 1. С. 10–17.

4. Ермаков А.П., Степанов П.Ю. Сейсморазведка неоднородных сред. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. 122 с.

5. Облогина Т.И. Кинематическая теория сейсмических волн в неоднородных анизотропных средах // Вестн. Моск. ун-та. 1998. № 6. С. 52–59.

6. Облогина Т.И., Степанов П.Ю. К теории временных изображений отражающих границ в трехмерных средах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2003. № 2. С. 59–62.

7. Степанов П.Ю. Алгоритмы глубинной кинематической миграции в трехмерных средах: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2000. 137 с.

8. Степанов П.Ю., Гоманюк Ю.А. Математическое моделирование кинематики сейсмических волн в сложнопостроенных средах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 167–178.

9. Cerveny V. Seismic Ray Theory. 1st Ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 713 p.

10. Rawlinson N., Hauser J., Sambridge M. Seismic ray tracing and wavefront tracking in laterally heterogeneous media // Advances in Geophysics. 2007. Vol. 49. P. 203–267.

Статья поступила в редакцию 10.08.2023,
одобрена после рецензирования 02.10.2023,
принята к публикации 22.01.2024