

УДК 550.34.013.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ОДНОРОДНЫХ ФУНКЦИЙ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Юлия Александровна Гоманюк¹, Павел Юрьевич Степанов^{2✉},
Александр Петрович Ермаков³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; juliagmn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1253-4689>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; seismic310@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-8131-8998>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ermakal@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5894-7211>

Аннотация. Представлены результаты применения вариационного алгоритма лучевого трассирования для исследования возможностей и ограничений одного из методов решения обратной кинематической задачи сейсморазведки — метода однородных функций, разработанного на кафедре сейсмометрии и геоакустики МГУ имени М.В. Ломоносова. В результате расчетов на синтетических моделях и полевом материале сделаны выводы о разведочных возможностях и областях применения метода однородных функций. На модельных примерах показано, что метод однородных функций дает корректные результаты только для простых сред — вертикально-неоднородных или слоистых со слабонаклоненными границами, а складки или включения он позволяет восстановить только на качественном уровне. При работе с реальными полевыми данными установлено, что метод однородных функций корректно восстанавливает скоростное строение разреза до глубины 1/3–1/2 от максимальной глубины проникновения лучей. При этом на получаемых скоростных разрезах имеет смысл интерпретировать только аномалии больших размеров с контрастными значениями скорости сейсмических волн.

Ключевые слова: метод однородных функций, обратная кинематическая задача, лучевое трассирование, сейсмический луч, неоднородные среды, рефрагированные волны

Для цитирования: Гоманюк Ю.А., Степанов П.Ю., Ермаков А.П. Исследование ограничений в области применимости метода однородных функций решения обратной кинематической задачи сейсморазведки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 1. С. 85–96. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-85-96

INVESTIGATION OF THE LIMITATIONS AND APPLICABILITY OF THE METHOD OF HOMOGENEOUS FUNCTIONS FOR SOLVING THE INVERSE KINEMATIC PROBLEM OF SEISMIC EXPLORATION

Julia A. Gomanyuk¹, Pavel Yu. Stepanov^{2✉}, Alexander P. Ermakov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; juliagmn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1253-4689>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; seismic310@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-8131-8998>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ermakal@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5894-7211>

Abstract. The results of the application of the variational ray tracing algorithm to study the possibilities and limitations of one of the methods for solving the inverse kinematic problem of seismic exploration — the method of homogeneous functions developed at the Department of Seismometry and Geoacoustics of Moscow State University are presented. As a result of the calculations carried out on synthetic models and field material, conclusions were drawn about the exploration possibilities and areas of application of the method of homogeneous functions. Model examples show that the method of homogeneous functions gives correct results only for simple media: vertically inhomogeneous or layered with slightly inclined boundaries, and folds or inclusions can be restored only at a qualitative level. When working with real field data, the method of homogeneous functions correctly restores the velocity structure of the section to a depth of 1/3–1/2 of the maximum depth of ray penetration. At the same time, it makes sense to interpret only large anomalies with contrasting velocity values on the obtained velocity sections.

Key words: method of homogeneous functions, inverse kinematic problem, ray tracing, seismic ray, inhomogeneous media, refracted waves

For citation: Gomanyuk J.A., Stepanov P.Yu., Ermakov A.P. Investigation of the limitations and applicability of the method of homogeneous functions for solving the inverse kinematic problem of seismic exploration. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 1: 85–96. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-85-96 (In Russ.).

Введение. При исследовании сложнопостроенных геологических сред сейсмическим методом первых вступлений (МПВ) широкое применение получил алгоритм решения обратной кинематической задачи, известный как метод однородных функций, разработанный В.Б. Пийп на кафедре сейсмометрии и геоакустики Московского университета имени М.В. Ломоносова [Пийп, 1978]. Метод однородных функций позволяет по системе встречных и нагоняющих годографов первых вступлений рефрагированных волн восстановить сейсмогеологический разрез в изолиниях скорости упругих волн (двумерное скоростное поле), по которому в дальнейшем проводится геологическая интерпретация с выделением различных геологических структур, тектонических нарушений и т. п.

Удобство использования при решении широкого круга задач инженерной и глубинной сейсморазведки, отсутствие принципиальных ограничений на используемые входные данные и полностью автоматизированный процесс решения обратной задачи, все это способствовало широкому внедрению метода однородных функций в практику российских геофизических организаций, при этом задача исследования возможностей метода однородных функций до настоящего времени не была решена в полном объеме. Классический подход к определению точности решения обратной задачи подразумевает контроль и анализ получаемых результатов с использованием точных методов решения прямой кинематической задачи как на теоретических моделях, так и на реальных полевых данных.

С этой целью в работе был использован разработанный на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова вариационный алгоритм решения прямой кинематической задачи способом лучевого трассирования [Степанов, Гоманюк, 2022; Облогина, 1998]. Лучевое трассирование — один из основных подходов к решению прямых кинематических задач сейсморазведки. Прослеживание сейсмических лучей позволяет детально изучить характер распространения упругих волн в различных средах и с высокой точностью рассчитать время пробега волны от источника до любой точки геологической среды [Cerveny, 2001].

Таким образом, целью работы было исследование возможностей метода однородных функций с помощью реализованного авторами вариационного алгоритма лучевого трассирования. Тот факт, что подобные исследования до этого времени не проводились (за исключением нескольких простых моделей, рассмотренных в работе [Пийп, 1988]), определяет научную новизну и практическую значимость выполненной работы.

Теоретические основы метода однородных функций подробно рассмотрены в работах [Пийп, 1978, 1991; Piip, 2001]. В основе метода лежит идея двумерной аппроксимации скоростного поля не-

прерывной однородной функцией произвольной степени в освещенной сейсмическими лучами области разреза по двум встречным годографам первых вступлений. Затем осуществляется суперпозиция скоростных функций, вычисленных для разных пар встречных годографов. В сущности, этот метод — обобщение метода Герглотца–Вихерта–Чибисова для двумерных сред [Пийп, 1978]. В работах [Пийп, Ермаков, 2011; Пийп, Ефимова, 2014] рассмотрены примеры применения метода однородных функций для выделения ряда геологических обстановок и структур: разломов, соляных куполов, оползней, складчатых областей и др.

Исследование точности решения обратной кинематической задачи на теоретических моделях. Для выяснения пределов применимости и ограничений метода однородных функций алгоритм решения обратной кинематической задачи изучали на теоретических моделях сейсмических сред различной сложности. Для каждой модели была решена прямая кинематическая задача с использованием вариационного алгоритма лучевого трассирования, а затем результаты ее решения (годографы рефрагированных волн) подавались на вход программы Годограф, реализующей метод однородных функций. Затем качественно и количественно сравнивали исходную модель и скоростной разрез, полученный в результате решения обратной задачи методом однородных функций (рис. 1).

Далее для полученного в результате решения обратной задачи скоростного разреза снова решали прямую кинематическую задачу. После этого сопоставляли соответствующие годографы рефрагированных волн, на основе чего для множества моделей выявляли общие закономерности, определяющие возможности метода однородных функций (рис. 1).

Результаты исследований и их обсуждение. *Модель вертикально-неоднородной среды* с контрастной границей второго рода представлена на рис. 2, а. Вертикально-неоднородная среда со скоростным законом $V = V(z)$ — одна из базовых моделей сред в сейсморазведке. Именно поэтому она была выбрана в качестве первой модели для расчетов, а также в качестве начальной модели для построения более сложных моделей сейсмических сред.

На разрезе, полученном в результате решения обратной задачи в программе Годограф, так же, как и на исходной модели, довольно четко прослеживается зона смены градиентов на глубине около 50 м (рис. 2, а). Величины градиентов в скоростном поле, восстановленном методом однородных функций, соответствуют градиентам исходной модели. Максимальная глубина полученной модели составляет 267 м. В краевых частях модели проявляются незначительные скоростные неоднородности. На рис. 2, б представлена разность исходного и восстановленного методом однородных функций скоростных полей (поле невязки значений скорости). Как видно на этом рисунке, скоростная невязка составляет несколько

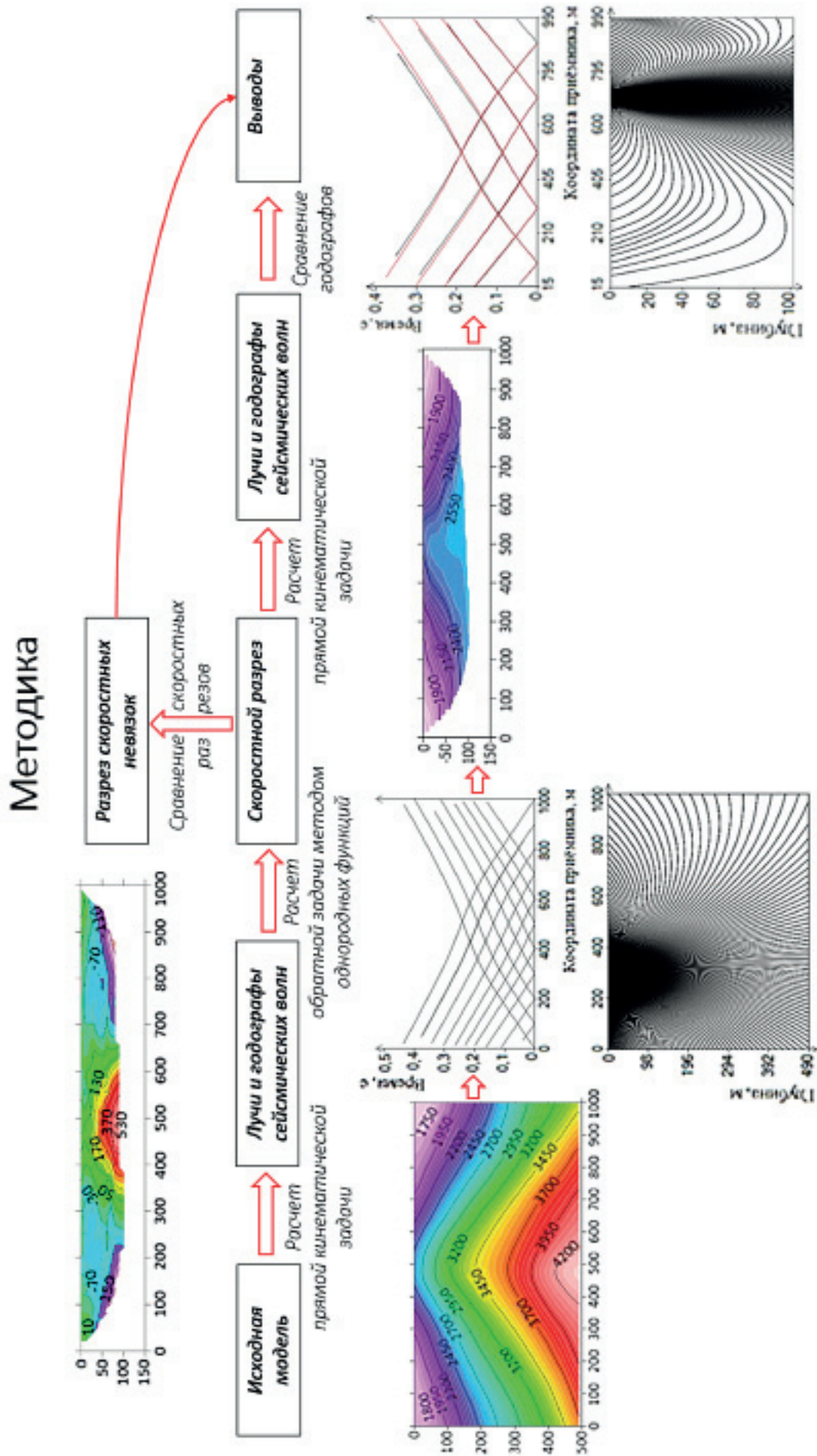


Рис. 1. Методика исследования возможностей метода однородных функций на теоретических моделях с использованием вариационного алгоритма решения прямой кинематической задачи сейсморазведки

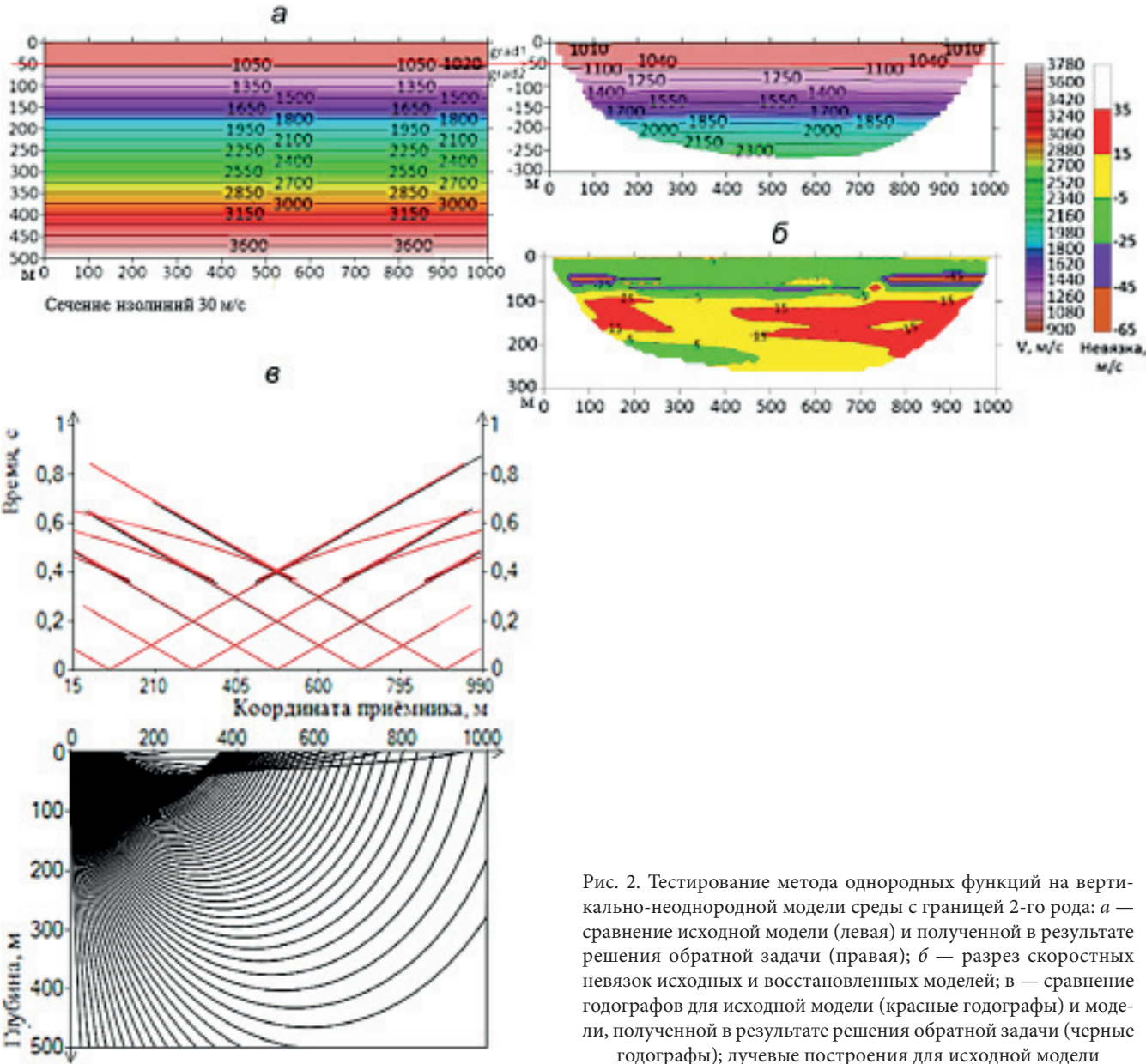


Рис. 2. Тестирование метода однородных функций на вертикально-неоднородной модели среды с границей 2-го рода: а — сравнение исходной модели (левая) и полученной в результате решения обратной задачи (правая); б — разрез скоростных невязок исходных и восстановленных моделей; в — сравнение годографов для исходной модели (красные годографы) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (черные годографы); лучевые построения для исходной модели

десятков метров в секунду, в некоторых частях модели достигая 50–60 м/с (рис. 2, б).

Годографы для обеих моделей содержат петли, появление которых объясняется поведением сейсмических лучей в области резкого изменения градиента скорости (рис. 2, в). Кроме того, наблюдается почти полное совпадение годографов, рассчитанных для исходной модели (красные годографы), и модели, полученной в результате решения обратной задачи методом однородных функций (черные годографы). В области петель можно увидеть незначительное расхождение годографов для двух моделей (рис. 2, в).

Расчеты позволили сделать вывод, что метод однородных функций для вертикально-неоднородных сред, в том числе для сред с меняющимся градиентом скорости, дает возможность восстановить исходную модель среды практически без искажений.

Двумерно-неоднородная модель среды с линейным градиентом скорости по обеим координатам,

скорость в которых описывается скоростным законом

$$V(x, z) = V_0(1 + k_1x + k_2z),$$

представлена на рис. 3, а, где k_1 — горизонтальный градиент скорости (1/м); k_2 — вертикальный (1/м); x — расстояние по профилю (м). Эти скоростные зависимости описывают косослоистые среды с непрерывным скоростным законом $V(x, z)$. Задачей исследований на этом этапе было изучение двумерных моделей с различным соотношением величин горизонтального и вертикального градиентов скорости и выявление примерного соотношения вертикального и горизонтального градиентов, при превышении которого результат решения обратной задачи методом однородных функций не вполне удовлетворителен.

В модели, представленной на рис. 3, а, вертикальный градиент скорости в 3 раза превышает горизонтальный, что соответствует приблизительно

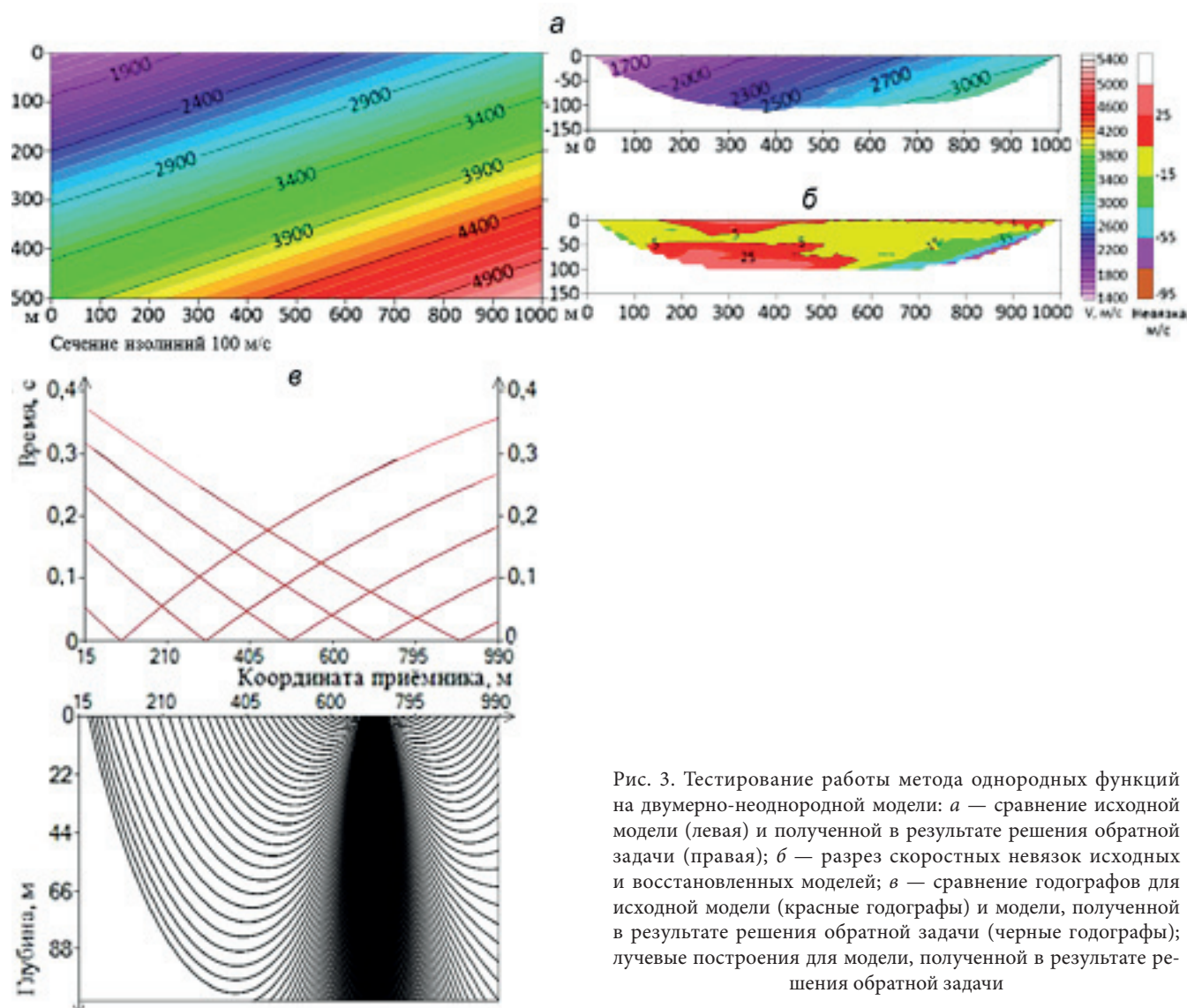


Рис. 3. Тестирование работы метода однородных функций на двумерно-неоднородной модели: а — сравнение исходной модели (левая) и полученной в результате решения обратной задачи (правая); б — разрез скоростных невязок исходных и восстановленных моделей; в — сравнение годографов для исходной модели (красные годографы) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (черные годографы); лучевые построения для модели, полученной в результате решения обратной задачи

20-градусному наклону изолиний скоростного поля (т. е. слоев горных пород в разрезе). В результате решения обратной задачи была получена двумерно-неоднородная модель с максимальной глубиной 110 м (рис. 3, а). Горизонтальный и вертикальный градиенты скорости совпадают с градиентами для исходной модели. Наблюдается незначительное искажение изолиний скорости, которое может внести ошибку в результаты решения прямой задачи от полученной модели, поэтому для решения прямых задач в большинстве случаев проводилось сглаживание методом взвешенного осреднения в скользящем окне. Максимальная невязка значений скорости исходной и полученной моделей составила 50 м/с, что можно считать хорошим результатом (рис. 3, б).

Для этой модели также наблюдается почти полное совпадение годографов, рассчитанных для исходной модели, которая задана аналитически (красные годографы), и модели, полученной в результате решения обратной задачи методом однородных функций (черные годографы) (рис. 3, в). Лучевые построения не симметричны относительно

пункта возбуждения лучей, и система годографов не симметрична относительно центра профиля, что свидетельствует о наличии в модели горизонтального градиента скорости (рис. 3, в).

Таким образом, для двумерно-неоднородной модели косослоистой среды с небольшим горизонтальным градиентом скорости метод однородных функций также позволяет восстановить исходную модель среды практически без искажений.

Затем мы рассмотрели ряд моделей, приближенно описывающих некоторые структуры, встречающиеся в реальных средах: флексуры, складки, высокоскоростные включения.

Флексура. Одна из простейших скоростных моделей, схожих с вертикально неоднородной — модель флексуры. Амплитуда флексуры в использованной нами модели составила 200 м (рис. 4, а).

Разрез, полученный в результате решения обратной задачи, представляет собой двумерно-неоднородную модель среды с глубиной до 78 м. Для удобства сравнения исходная скоростная модель здесь и далее обрезана до максимальной глубины

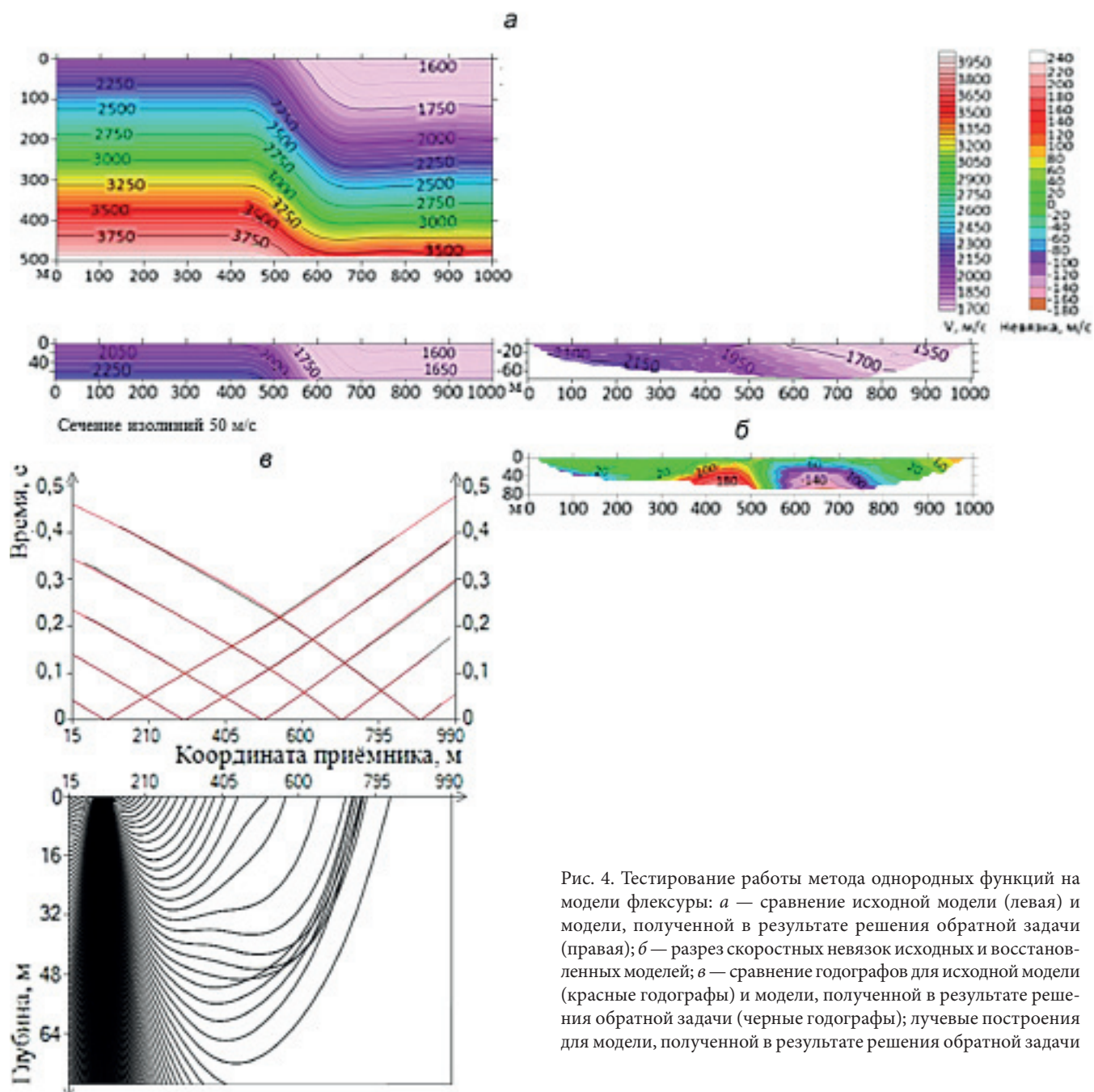


Рис. 4. Тестирование работы метода однородных функций на модели флексуры: а — сравнение исходной модели (левая) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (правая); б — разрез скоростных невязок исходных и восстановленных моделей; в — сравнение годографов для исходной модели (красные годографы) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (черные годографы); лучевые построения для модели, полученной в результате решения обратной задачи

разреза, полученного при решении обратной задачи. Степень в изолиниях на полученном при решении обратной задачи разрезе четко не прослеживается, однако в левой части разреза просматривается структура, напоминающая ступень (рис. 4, а). Градиент скорости в модели меняется слева направо и в целом соответствует градиенту исходной модели. Максимальная скоростная невязка моделей составляет 240 м/с (рис. 4, б).

Наблюдается почти полное совпадение годографов, рассчитанных по исходной модели (красные годографы), и по модели, полученной в результате решения обратной задачи (черные) (рис. 4, в). Это свидетельствует о том, что метод однородных функций для указанной модели позволяет получить

корректное решение обратной задачи с точки зрения времени пробега волн, при этом восстановить точную форму структуры при решении обратной задачи не удается.

Антиклиналь. На рис. 5, а представлена модель антиклинальной складки с амплитудой приблизительно 200 м. Скоростной разрез, полученный в результате решения обратной задачи, представляет собой модель антиклинальной складки с амплитудой около 100 м (рис. 5, а). Общий вид полученной структуры похож на исходную модель, однако скорость в ядре складки составляет около 2500 м/с, в то время как для исходной модели скорость в ядре складки около 3000 м/с, в связи с чем максимальная скоростная невязка моделей достигает 600 м/с (рис. 5, б). Для

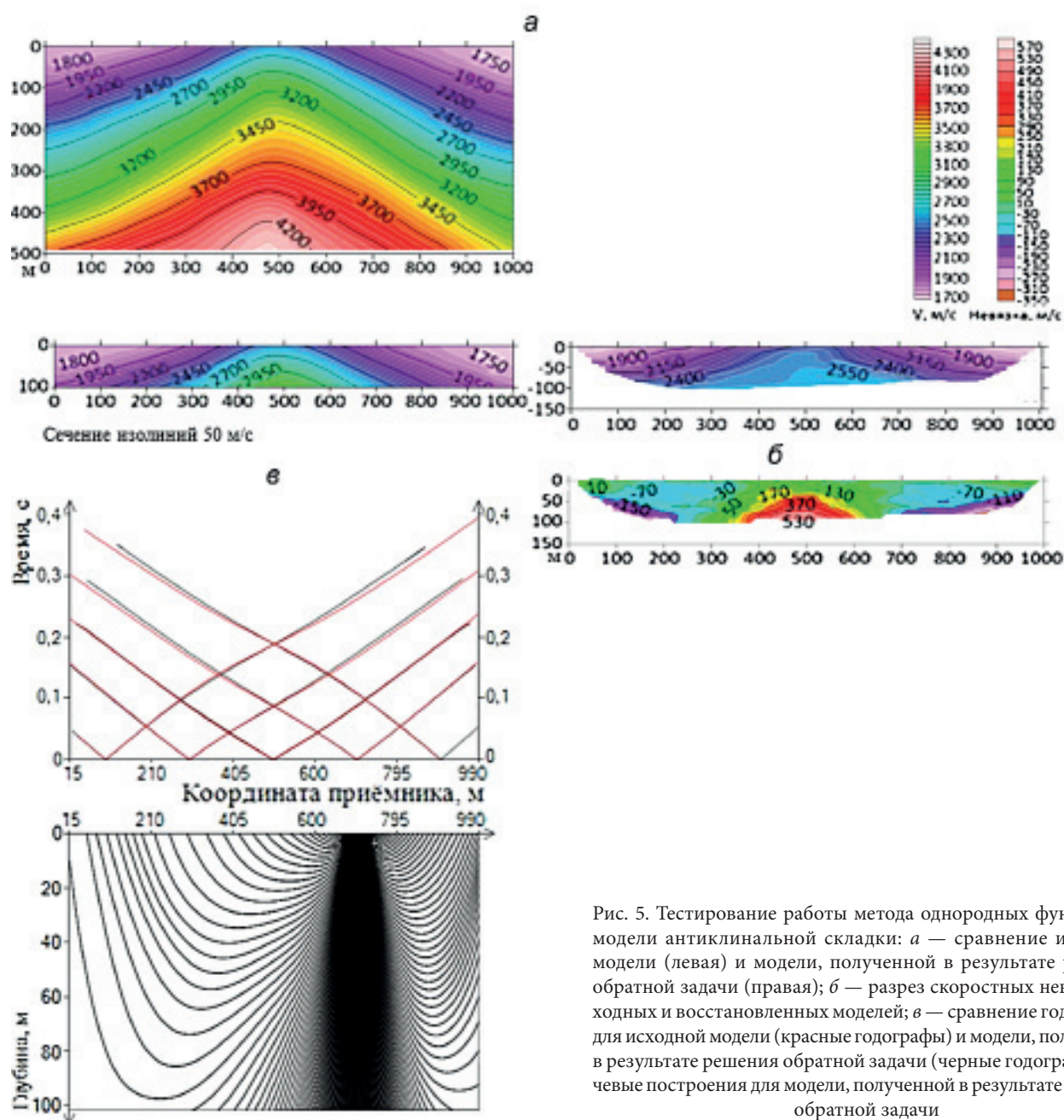


Рис. 5. Тестирование работы метода однородных функций на модели антиклинальной складки: *а* — сравнение исходной модели (левая) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (правая); *б* — разрез скоростных невязок исходных и восстановленных моделей; *в* — сравнение годографов для исходной модели (красные годографы) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (черные годографы); лучевые построения для модели, полученной в результате решения обратной задачи

корректного решения прямой задачи потребовалось существенно сгладить восстановленный методом однородных функций скоростной разрез. Наблюдается хорошая степень совпадения годографов для исходной и полученной программой Годограф моделей (рис. 5, в), т.е. результат решения обратной задачи методом однородных функций удовлетворительный, при этом восстановить точные свойства антиклинальной складки при решении обратной задачи не удалось.

Синклиналь. На рис. 6, а приведен пример модели синклинальной гребневидной складки. Амплитуда складки составляет около 250 м. Разрез, полученный в результате решения обратной задачи, представляет собой модель синклинальной складки амплитудой около 100 м. Глубина полученной модели 270 м (рис. 6, а). Скорость в ядре полученной

складки совпадает со скоростью в исходной модели, однако форма складки отличается от исходной — она больше напоминает сундучную (прямоугольную) складку, чем узкую гребневидную, а ширина складки приблизительно в 1,5 раза превышает ширину исходной складки. Скоростное поле под складкой представляет собой вертикально-неоднородную среду с незначительным изгибом изолиний вверх. Кроме того, в краевых частях модели возникают высокоскоростные включения. Максимальная невязка значений скорости в моделях составляет 1500 м/с (рис. 6, б).

Наблюдается не очень высокая степень совпадения годографов для исходной и полученной программой Годограф моделей (рис. 6, в). Результат решения обратной задачи методом однородных функций в этом случае не вполне удовлетворителен.

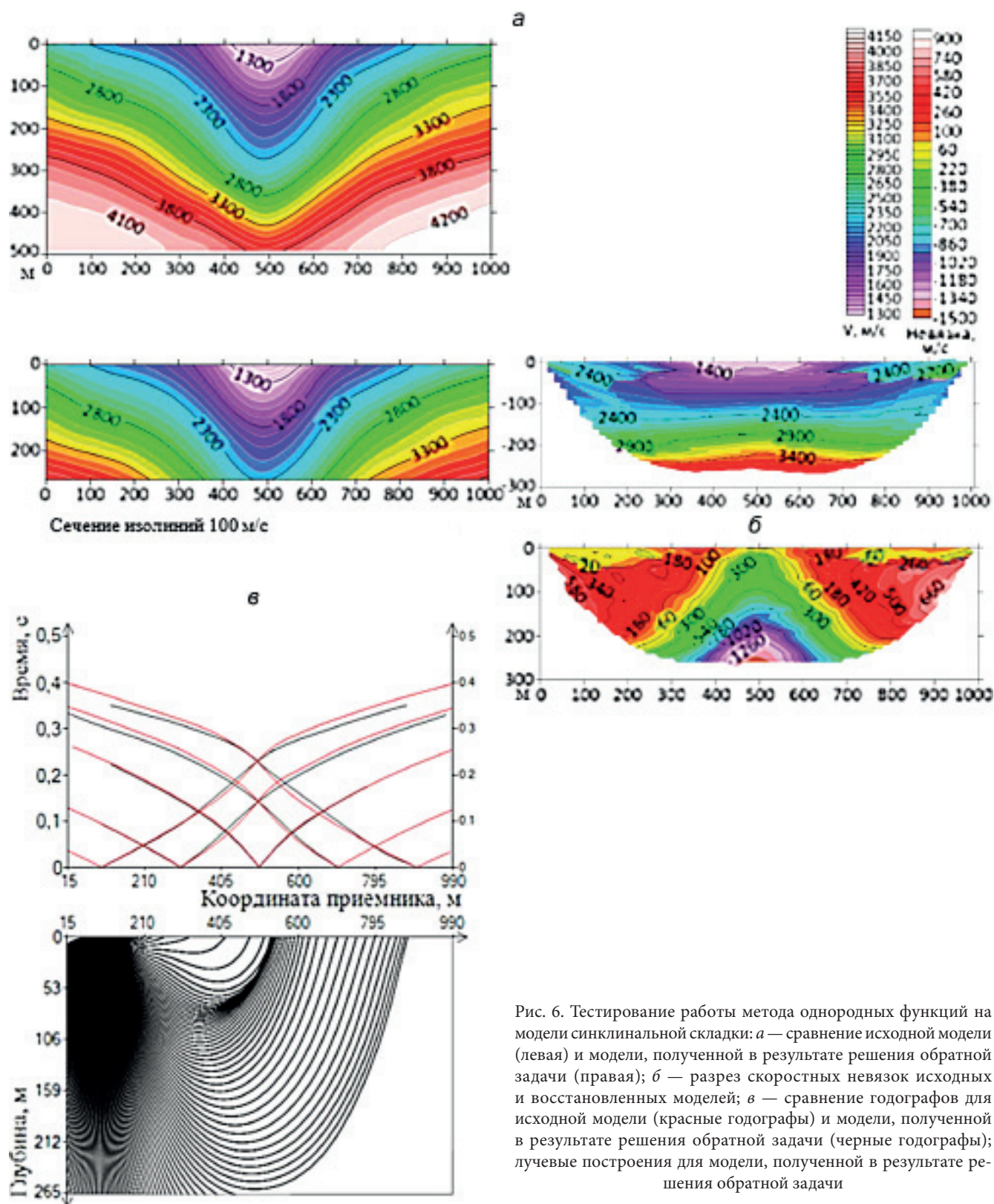


Рис. 6. Тестирование работы метода однородных функций на модели синклинальной складки: а — сравнение исходной модели (левая) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (правая); б — разрез скоростных невязок исходных и восстановленных моделей; в — сравнение годографов для исходной модели (красные годографы) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (черные годографы); лучевые построения для модели, полученной в результате решения обратной задачи

Можно сделать следующий вывод: возможность качественного решения обратной задачи методом однородных функций определяется параметрами складок — амплитудой и шириной. Узкие и высокоамплитудные складки не могут быть полноценно восстановлены при решении обратной задачи методом однородных функций, в отличие от более плавных и широких складок.

Высокоскоростное включение. Оценим возможность решения обратной задачи методом однородных функций для модели с высокоскоростным включением, которое может соответствовать интрузивному образованию или участку уплотнения пород.

На рис. 7, а приведен пример модели с высокоскоростным включением. Размеры включения при-

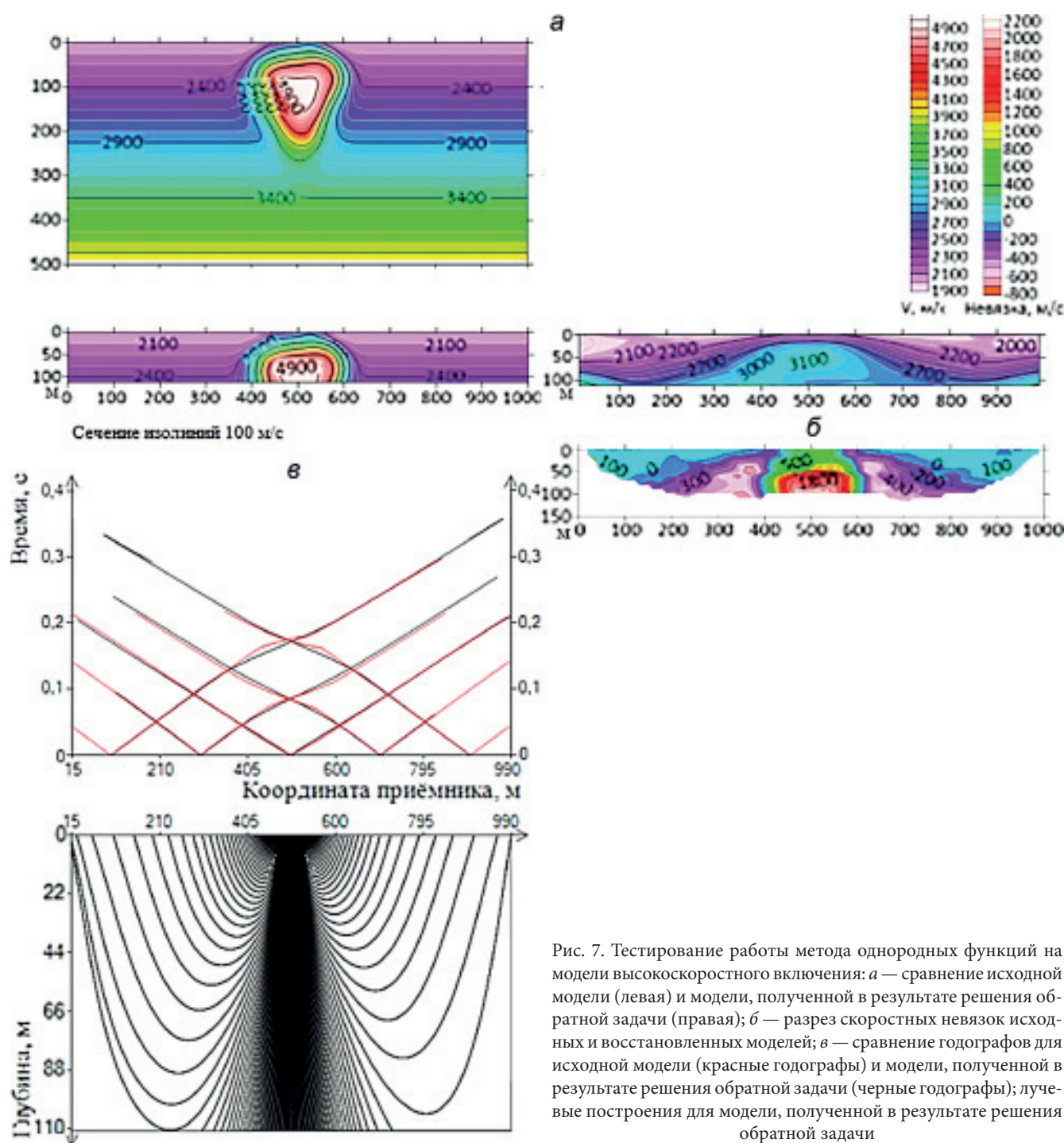


Рис. 7. Тестирование работы метода однородных функций на модели высокоскоростного включения: а — сравнение исходной модели (левая) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (правая); б — разрез скоростных невязок исходных и восстановленных моделей; в — сравнение годографов для исходной модели (красные годографы) и модели, полученной в результате решения обратной задачи (черные годографы); лучевые построения для модели, полученной в результате решения обратной задачи

близительно 250×300 м, скорость распространения упругих волн во включении составляет 5000 м/с при скорости во вмещающих породах 2500 м/с. Это включение может описывать интрузивное образование.

Скоростной разрез глубиной 110 м, полученный в результате решения обратной задачи, представляет собой модель, напоминающую синклиналию складку амплитудой около 100 м (рис. 7, а). При этом в центральной части складки наблюдается замкнутая высокоскоростная структура. Значение скорости в пределах этой структуры составляет 3000 м/с и значительно отличается от скорости (5000 м/с) в

изначально заданном включении. Для корректного решения прямой задачи потребовалось существенно сгладить восстановленный методом однородных функций скоростной разрез. Максимальная невязка значений скорости в моделях составляет 2200 м/с (рис. 7, б).

Наблюдается удовлетворительная степень совпадения годографов для исходной и полученной в результате решения обратной задачи моделей (рис. 7, в). Однако выявить высокоскоростное включение и правильно восстановить в пределах него скорость с помощью метода однородных функций не удается.

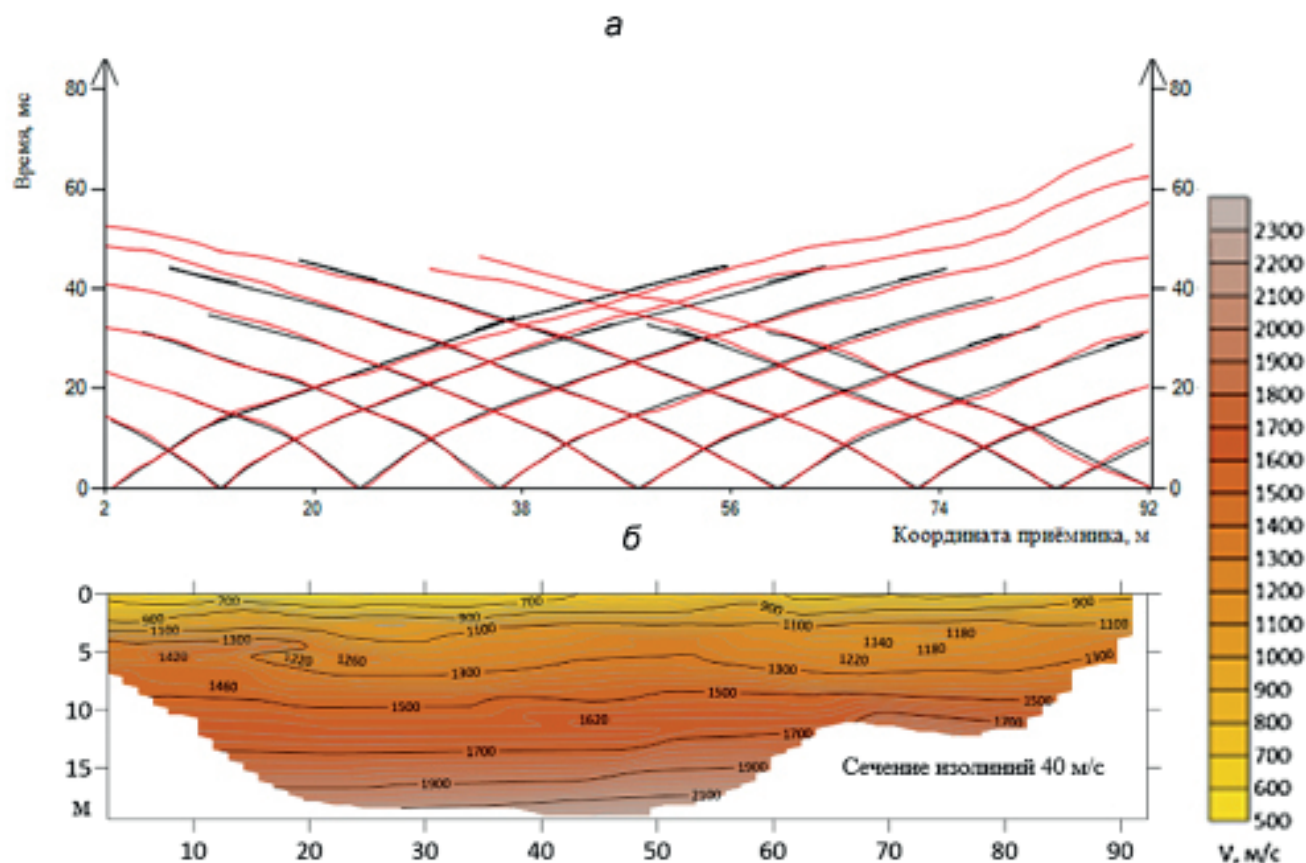


Рис. 8. Сравнение синтетических (черные) и полевых (красные) годографов для профиля 1 (а) и скоростной разрез по профилю 1 (б)

Таким образом, во-первых, метод однородных функций позволяет успешно решить обратную задачу для вертикально-неоднородных сред, а также двумерно-неоднородных сред с горизонтальными градиентами скорости, не превышающими вертикальные (при наклоне изолиний скорости не более 45°); во-вторых, метод однородных функций не позволяет полноценно восстанавливать высокоскоростные включения. На качественном уровне решается задача «обнаружения» объекта, но не более того; в-третьих, метод однородных функций позволяет восстановить складки или включения только на качественном уровне. Количественные характеристики, а иногда и форма структуры восстанавливаются некорректно.

Исследование точности решения обратной кинематической задачи методом однородных функций на полевых данных. В дополнение к исследованиям на теоретических моделях возможности метода однородных функций исследованы нами на реальных полевых данных МПВ. По скоростным разрезам, восстановленным методом однородных функций, решали прямую задачу способом лучевого трассирования, а затем проводили сравнение полевых годографов и годографов, полученных в результате решения прямой задачи.

Район исследований расположен на Крымском п-ове в г. Севастополь. На участке работ пробурено

15 инженерно-геологических скважин с максимальной глубиной забоя 18 м. По данным бурения скважин охарактеризовано инженерно-геологическое строение участка строительства.

Геологический разрез исследуемого участка работ представлен верхнемиоценовыми отложениями нижнего неогена (сарматский ярус, средний горизонт N_1S_2) — переслаиванием органогенно-хемогенных известняков, имеющих различную степень прочности, и глин. Сарматские отложения перекрыты техногенными грунтами мощностью до 3 м.

Профиль 1. Скоростной разрез описывает практически вертикально-неоднородную среду с несколькими аномалиями, выделяющимися на разрезе в виде замкнутых структур и изгибов в изолиниях скорости (рис. 8, б). Скорость продольных волн в модели изменяется от 500 до 2300 м/с. Максимальная глубина восстановленной скоростной модели составляет 19 м, длина профиля 92 м. В правой части профиля глубинность исследования уменьшается почти в 2 раза по сравнению с центральной частью. Пункты возбуждения расположены вдоль профиля на пикетах 0, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 94 м.

Сравнение полевых годографов и годографов, полученных в результате решения прямой кинематической задачи по этому скоростному полю, позволяет сделать следующие выводы (рис. 8, а):

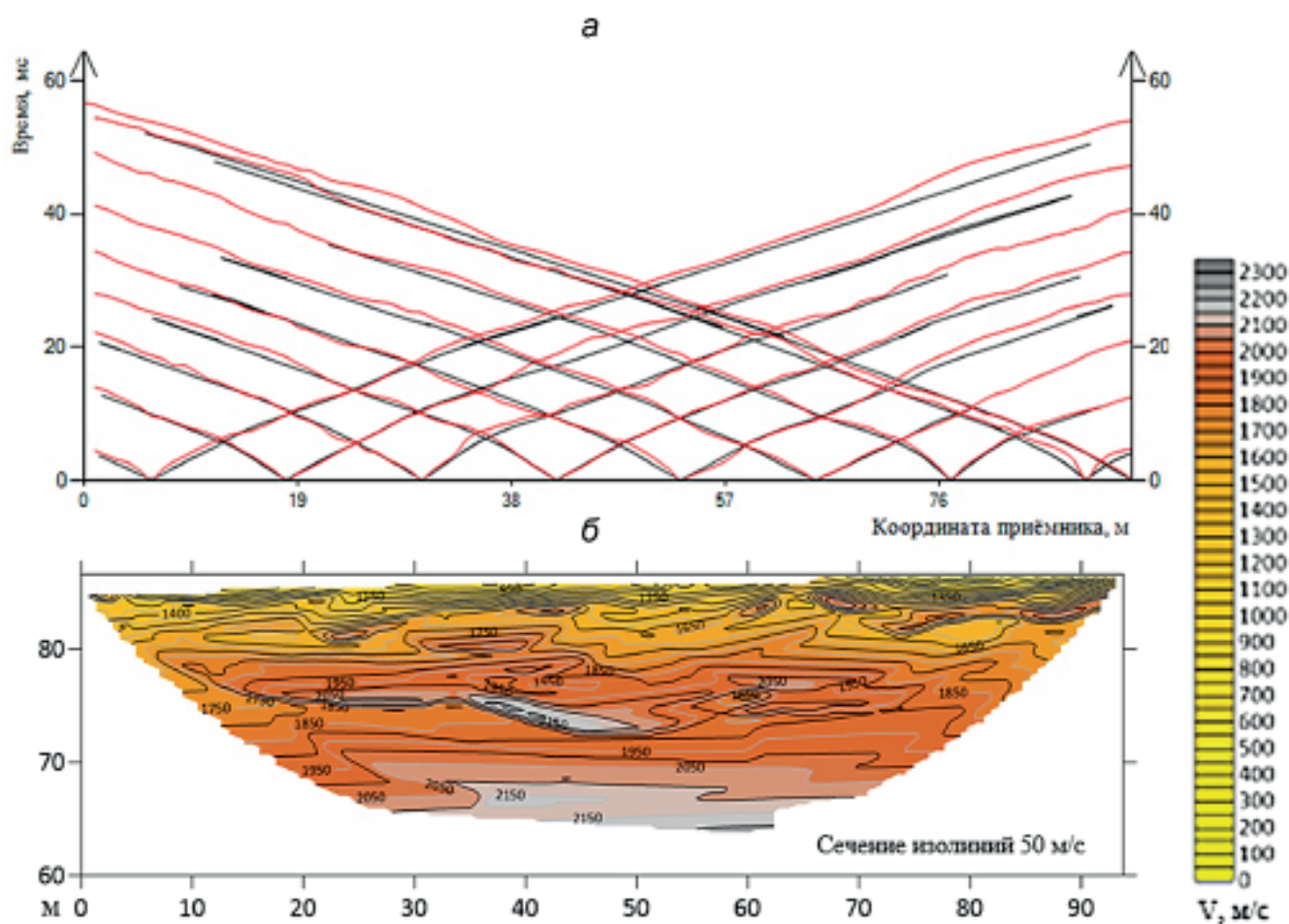


Рис. 9. Сравнение синтетических (черные) и полевых (красные) годографов для профиля 2 (а) и скоростной разрез по профилю 2 (б)

– до глубины около 8–10 м наблюдается почти полное совпадение полевых и синтетических годографов;

– на большей глубине наблюдается незначительное расхождение годографов;

– в целом наблюдается хорошее совпадение годографов. Таким образом, метод однородных функций для этого скоростного поля дает вполне корректное решение.

Обратим внимание на особенности лучевых построений: наличие скоростных неоднородностей в левой и правой частях профиля приводит к возникновению сгущений и петель на лучевых построениях, как следствие синтетические годографы также содержат петли, которых не было на полевых годографах.

Профиль 2. Сейсмический разрез в изолиниях скоростей распространения продольных волн получен в результате работ по другому профилю на том же участке (рис. 9, б). Скоростная модель представляет собой сложный набор замкнутых структур и изгибов изолиний скорости. Скорость продольных волн в модели изменяется от 600 до 2300 м/с. Максимальная глубина разреза составляет 23 м, длина профиля 92 м. Шаг пунктов возбуждения вдоль профиля 6 м. В верхней части модели на глубине

до 5 м выделяется слой с повышенным градиентом скорости (рис. 9, б). Анализ годографов и значений скорости позволяет предположить, что скоростные аномалии на этом разрезе могут быть связаны с формой годографов, поданных на вход программе решения обратной кинематической задачи: годографы содержат изломы, из-за которых и возникают неоднородности в восстановленном скоростном поле.

При расчете лучей в процессе решения прямой кинематической задачи для этой модели применяли сглаживание исходных данных, однако, несмотря на это, в скоростном поле частично сохранились скоростные неоднородности, поэтому на лучевых построениях и годографах возникли особенности в виде петель.

Сравнение полевых годографов и годографов, полученных в результате решения прямой кинематической задачи по рассматриваемому разрезу, а также анализ модели позволяет сделать следующие выводы (рис. 9, а): в целом наблюдается удовлетворительное совпадение полевых и синтетических годографов; результат решения обратной задачи методом однородных функций в данном случае не совсем удовлетворителен, так как входные данные нуждаются в значительном сглаживании. Кроме того, метод однородных функций не позволяет с до-

статочной точностью восстановить локальные аномалии скорости, т. е. высоко- или низкоскоростные включения, поэтому описывать эту модель с точки зрения наличия в верхней части разреза аномальных геологических или техногенных объектов нельзя не только по причине некорректности входных данных.

Заключение. Алгоритм вариационного решения прямой кинематической задачи был применен для исследования ограничений и области применимости метода однородных функций решения обратной кинематической задачи. В результате исследований на синтетических моделях и полевом материале выявлено, что:

- метод однородных функций дает корректные результаты для простых сред: вертикально-неоднородных, слоистых с горизонтальными или слабонаклоненными границами;

- метод позволяет восстановить складки или включения только на качественном уровне. Количественные характеристики, а иногда и форма структуры восстанавливаются некорректно;

- при работе с реальными полевыми данными, полученными в сложных сейсмогеологических условиях, метод однородных функций, как правило, корректно восстанавливает скоростное строение разреза до глубины 1/3–1/2 от максимальной глубины проникновения лучей;

- на получаемых методом однородных функций скоростных разрезах целесообразно выделять и интерпретировать как какие-либо геологические структуры только аномалии большого размера с контрастными значениями скорости сейсмических волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Облогина Т.И. Кинематическая теория сейсмических волн в неоднородных анизотропных средах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1998. № 6. С. 52–59.

Пийп В.Б. Способ определения разреза в изолиниях скорости по годографам рефрагированных волн // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 8. С. 65–72.

Пийп В.Б. Кинематическая интерпретация сейсмических данных в средах с переменными скоростями: Автореф. докт. дисс. Новосибирск, 1988.

Пийп В.Б. Локальная реконструкция сейсмического разреза по данным преломленных волн на основе однородных функций // Физика Земли. 1991. № 10. С. 24–32.

Пийп В.Б., Ермаков А.П. Океаническая кора Черноморской впадины по сейсмическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 5. С. 61–68.

Пийп В.Б., Ефимова Е.А. Методы однородных функций и моделирования для восстановления геологического разреза в Тибете по годографам преломленных волн // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 5. С. 96–106.

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

Cerveny V. Seismic ray theory. 1st Edit. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 713 p.

Piip V.B. 2D inversion of refraction traveltime curves using homogeneous functions // Geophys. Prospecting. 2001. Vol. 49. P. 461–482.

Статья поступила в редакцию 01.12.2022,
одобрена после рецензирования 12.12.2022,
принята к публикации 12.03.2022