

УДК 550.834

О методе поверхностно-волновой томографии и перспективах его применения в инженерной сейсморазведке

И. С. Левин¹, А. В. Пономаренко^{1,2}, В. В. Половков^{1,2},
Д. А. Попов^{1,2}, В. Н. Троян¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Центр комплексных морских исследований СПбГУ,
Российская Федерация, 199155, Санкт-Петербург, ул. Одоевского, 24

Для цитирования: Левин, И. С., Пономаренко, А. В., Половков, В. В., Попов, Д. А., Троян, В. Н. (2022). О методе поверхностно-волновой томографии и перспективах его применения в инженерной сейсморазведке. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 67 (2), 202–226. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.201>

В инженерной сейсморазведке в большинстве случаев верхнюю часть геологического разреза изучают с помощью преломленных и поверхностных волн, причем регистрация и обработка поверхностных волн выполняется в рамках метода MASW (многоканальный анализ поверхностных волн). Настоящая работа посвящена рассмотрению относительно нового подхода к изучению верхней части геологического разреза, который активно применяется в сейсмологии при исследовании верхней мантии и глубинной части земной коры, а именно метода поверхностно-волновой томографии. Данный метод представляет практический интерес, так как позволяет получать 3D-модели среды, обладает потенциально лучшим пространственным разрешением, чем широко используемый метод обработки поверхностных волн MASW, а также позволяет проводить удаленное изучение объектов, без расстановки приборов непосредственно над исследуемой зоной. В связи с этим метод особенно актуален при исследовании строения среды под зданиями, сооружениями, в недоступных зонах. В ходе настоящей работы было проведено тестирование разработанного алгоритма поверхностно-волновой томографии с использованием прямых лучей на модельных данных. Была выполнена оценка работоспособности алгоритма и его разрешающей способности, а также рассмотрены оптимальные системы наблюдений и параметры решения обратной задачи в рамках поверхностно-волновой томографии. По результатам проведенных исследо-

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2022

ваний можно заключить, что метод поверхностно-волновой томографии и разработанный алгоритм обработки данных с использованием прямых лучей можно эффективно использовать для решения инженерно-геологических задач на суше и в акваториях.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, поверхностные волны, верхняя часть разреза, сейсмическая томография.

1. Введение

Изучение верхней части геологического разреза — основная задача инженерной сейсморазведки. В ходе анализа сейсмических данных удается установить различные физические характеристики приповерхностной зоны, которые, в свою очередь, позволяют оценить свойства грунтов и выделить локальные неоднородности. Для решения данной задачи широко используется метод многоканального анализа поверхностных волн MASW (Park et al., 1999; Socco et al., 2010).

Метод поверхностно-волновой томографии на сегодняшний день в основном применяется в области сейсмологии при исследовании верхней мантии и глубокой части земной коры. В данной статье рассмотрено применение метода в области инженерной сейсморазведки, представляющее большой практический интерес: поверхностно-волновая томография позволяет получать 3D-модели среды и обладает потенциально лучшим пространственным разрешением, чем широко используемый метод обработки поверхностных волн MASW (Ponomarenko et al., 2019). Перспективы использования метода связаны также с возможностью проведения полевых работ, не требующих размещения приборов непосредственно над исследуемой зоной (расстановка приемников и источников проводится на удаленных профилях, частично или полностью совпадающих с периметром зоны). Поверхностно-волновая томография может быть эффективной и при площадных инженерно-геофизических исследованиях на шельфе с донными станциями, когда количество приемников ограничено.

2. Обзор метода поверхностно-волновой томографии

2.1. О сейсмической томографии

Метод сейсмической томографии заключается в оценке распределения фазовых или групповых скоростей сейсмических волн в среде по конечному числу данных о временах пробега волн по разным трассам, пересекающим область исследования. Преимущество использования поверхностных волн (томографии по поверхностным волнам по сравнению с томографией по объемным волнам) заключается в том, что они (в отличие от объемных волн) распространяются только в горизонтальных направлениях, поэтому их скорости можно определить из двумерной томографии, тогда как для объемных волн необходимо использовать трехмерную томографию (Яновская, 2015).

Метод поверхностно-волновой томографии позволяет восстанавливать 3D-модели среды по данным поверхностных волн, при этом задача определения скоростного строения трехмерной среды может быть разделена на две части. Первая — двумерная томография скоростей поверхностных волн для набора частот

(или периодов), вторая — одномерная обратная задача восстановления локальных вертикальных скоростных разрезов для каждой точки на поверхности среды. Решение первой задачи состоит в определении поправок к некоторому выбранному начальному распределению скоростей. Решение второй осуществляется за счет обработки данных для выбранных трасс на разных частотах и последующего обращения дисперсионных кривых. Такое разделение возможно в предположении о слабых горизонтальных вариациях скоростных параметров исследуемой среды (горизонтальные вариации должны быть малы на расстоянии порядка длины волны). В таких средах характеристики поверхностной волны (в первую очередь фазовая и групповая скорости) определяются локально для каждой точки поверхности, как в горизонтально-однородной среде. Данное допущение позволяет считать трассы, по которым распространяются поверхностные волны, прямыми линиями. Для начального приближения допустимо принимать постоянные значения скорости поверхностной волны для каждой частоты (каждого периода).

2.2. Метод Дитмара — Яновской

В качестве реализации метода поверхностно-волновой томографии рассмотрим метод Дитмара — Яновской, успешно применяемый в сейсмологии для решения задач по определению скоростного строения коры и верхней мантии.

Метод Дитмара — Яновской заключается в том, что в качестве априорного условия, влияющего на поведение скорости, принимается условие ее гладкости, а также постоянство значения искомой поправки к скорости на бесконечности (см. ниже). Решение томографической задачи определения поправок к некоторому начальному распределению скорости поверхностной волны при фиксированном значении частоты (или периода) представляется в виде разложения по специальным базисным функциям, которые позволяют получить решение аналитически. Поэтому программная реализация данного метода не требует численных решений для построения 2D-горизонтального распределения скорости поверхностных волн, что непосредственно оптимизирует время решения задачи. Кроме того, в отличие от других реализаций поверхностно-волновой томографии (например, метода Тарантола), не требуется априорного задания радиуса корреляции неоднородностей (Яновская, 2015), что позволяет уменьшить количество параметров.

Задача сейсмической томографии, основанная на данных о временах пробега волны t_i по разным трассам (лучам) L_i , пересекающим исследуемую область, формулируется как поиск функции распределения скорости $V(\mathbf{r})$ ($\mathbf{r} \in (2D, 3D)$) следующим образом:

$$t_i = \int_{L_i} \frac{ds}{V(\mathbf{r})} \quad (i = 1, 2, \dots, N).$$

При такой постановке задача является нелинейной, так как трасса L_i зависит от неизвестного распределения скорости. Но в предположении о том, что искомое распределение скорости мало отличается от некоторого заданного начального приближения $V_0(\mathbf{r})$ (математически это условие может быть записано в виде

$((V(\mathbf{r}) - V_0(\mathbf{r})) / V_0(\mathbf{r})) \ll 1$, разность между наблюдаемым временем пробега и вычисленным для начального распределения скорости $\delta t_i = t_i - t_{0i}$ будет линейно связана с поправкой к скорости $\delta V(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r}) - V_0(\mathbf{r})$ (или с поправкой к обратной к скорости величине — медленности $\delta S(\mathbf{r}) = V^{-1}(\mathbf{r}) - V_0^{-1}(\mathbf{r})$):

$$\delta t_i = \int_{L_{0i}} \delta S(\mathbf{r}) ds. \quad (1)$$

При этом интегрирование в (1) производится вдоль трассы, соответствующей начальному распределению скорости.

Разобьем исследуемую область некоторой сеткой на набор ячеек, в каждой из которых будем считать искомое значение скорости постоянным. Тогда поправки к начальному приближению можно определить из линейной системы уравнений, получаемой из (1):

$$\delta t_i = \sum_j A_{ij} \delta S_j, \quad (2)$$

где δS_j — искомая поправка к медленности в j -й ячейке; A_{ij} — коэффициент, связывающий прохождение волны вдоль i -го луча в j -й ячейке. Для удобства вместо размерных величин, которыми являются поправки к медленности, можно перейти к безразмерным, а именно относительным поправкам к медленности $m_j = V_{0j} \delta S_j$. В итоге получаем уравнение

$$\delta t_i = \sum_j \tau_{ij} m_j, \quad (3)$$

где $\tau_{ij} = A_{ij} / V_{0j}$. Эти коэффициенты являются временами пробега волны вдоль i -го луча через j -ю ячейку в среде с начальным распределением скорости:

$$\tau_{ij} = t_{0ij} = \int_{L_{0ij}} (ds) / (V_{0j}).$$

В качестве начального приближения допустимо принимать

постоянное значение скорости для всех ячеек, которое может быть рассчитано, например, как средняя скорость распространения волны по выбранным трассам в исследуемой области.

Так как любые измерения содержат ошибки, искомые поправки к медленности (параметры m_j) оцениваются из минимизации функционала:

$$\Phi(\mathbf{m}) = (\mathbf{Tm} - \delta \mathbf{t})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Tm} - \delta \mathbf{t}) + \alpha \Omega(\mathbf{m}). \quad (4)$$

Здесь $\delta \mathbf{t}$ — вектор с координатами δt_i ; \mathbf{m} — вектор с координатами m_j ; \mathbf{T} — матрица значений τ_{ij} ; $\Omega(\mathbf{m})$ — стабилизирующий функционал, который выбирается на основе априорных предположений о поведении скорости в рассматриваемой модели; \mathbf{R} — корреляционная матрица ошибок наблюдений; α — параметр регуляризации.

Рассмотрим представление, в котором искомая относительная поправка к медленности («модель») является функцией координат: $m(\mathbf{r})$ ($\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y)$). В этом случае эту функцию можно понимать как вектор в некотором многомерном пространстве. Запишем (3) в операторном виде через интегральное представление:

$$\delta \mathbf{t} = \mathbf{Gm} = \iint \mathbf{G}(\mathbf{r}) m(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (5)$$

где функции-ядра $G_i(\mathbf{r})$ отличны от нуля только на лучах (обращаются в бесконечность) и удовлетворяют следующему условию: $\iint G_i(\mathbf{r})d\mathbf{r} = \int_{L_{0i}} (ds)/V_0 = t_{0i}$ (в векторной записи $\iint \mathbf{G}(\mathbf{r})d\mathbf{r} = \mathbf{t}_0$). То есть интеграл от ядра равен времени пробега волны вдоль луча в модели среды с распределением скорости в начальном приближении. Подынтегральное выражение $G_i(\mathbf{r})d\mathbf{r}$ фактически соответствует значению τ_{ij} для некоторого j -го участка трассы, вдоль которой идет интегрирование.

В методе Дитмара — Яновской в качестве априорного предположения на изменение скорости принято условие ее гладкости, стабилизирующий функционал записывается в виде $\Omega(\mathbf{m}) = \iint |\nabla m(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}$. В дополнение к этому условию вводится еще ограничение на искомую функцию на бесконечности: $m(\mathbf{r}) = \text{const}$. Таким образом, решение задачи минимизации функционала (4) сводится к следующему:

$$(\mathbf{Gm} - \delta\mathbf{t})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Gm} - \delta\mathbf{t}) + \alpha \iint |\nabla m(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} = \min$$

$$m = \text{const} \quad \text{при} \quad |\mathbf{r}| \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Рассмотрим краткий вывод решения (6). Введем следующее обозначение:

$$\Lambda = \alpha^{-1} \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Gm} - \delta\mathbf{t}). \quad (7)$$

Тогда (6) запишем в виде

$$\Lambda^T (\mathbf{Gm} - \delta\mathbf{t}) + \iint |\nabla m(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} = \min$$

$$m = \text{const} \quad \text{при} \quad |\mathbf{r}| \rightarrow \infty. \quad (8)$$

Преобразуем второе слагаемое с помощью интегральной формулы Грина:

$$\iint (\nabla m, \nabla m) d\mathbf{r} = - \iint m(\mathbf{r}) \Delta m(\mathbf{r}) d\mathbf{r} + \oint_C m \frac{\partial m}{\partial n} dl. \quad (9)$$

Контурный интеграл в (9) по границе области C равен 0, так как $m(\mathbf{r}) = \text{const}$ на бесконечно удаленной границе области, и (8) принимает следующий вид:

$$\Lambda^T (\mathbf{Gm} - \delta\mathbf{t}) - \iint m(\mathbf{r}) \Delta m(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \min$$

$$m = \text{const} \quad \text{при} \quad |\mathbf{r}| \rightarrow \infty. \quad (10)$$

Решение, удовлетворяющее (10), удовлетворяет уравнению Пуассона (это можно получить из условия равенства нулю производной от левой части выражения в (10) по $m(\mathbf{r})$, в точках минимума):

$$\Delta m(\mathbf{r}) = \Lambda^T \mathbf{G} = \sum_i \lambda_i G_i(\mathbf{r}). \quad (11)$$

Решение (11) находится через функцию Грина двумерного оператора Лапласа $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2\pi} \ln |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ и имеет вид

$$m(\mathbf{r}) = \sum_i \lambda_i \iint G_i(\mathbf{r}') g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \Phi(\mathbf{r}), \quad (12)$$

где $\Phi(\mathbf{r})$ — произвольная гармоническая функция (удовлетворяющая уравнению Лапласа). Эта функция может быть только постоянной величиной, так как искомое решение должно быть постоянно при $|\mathbf{r}| \rightarrow \infty$ (как следствие одной из теорем о гармонических функциях — ее максимальное значение должно быть на границе области). Искомое решение принимает вид

$$m(\mathbf{r}) = \sum_i \lambda_i \psi_i(\mathbf{r}) + C = \boldsymbol{\Psi}^T \boldsymbol{\Lambda} + C, \quad (13)$$

где базисная функция $\psi_i(\mathbf{r})$ имеет следующий вид, как можно видеть из (12):

$$\psi_i(\mathbf{r}) = \iint G_i(\mathbf{r}') g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' = \frac{1}{2\pi} \int_{L_{0i}} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| \frac{ds_i}{V_0(\mathbf{r}_i)}. \quad (14)$$

В систему уравнений (13) входят $N+1$ неизвестных коэффициентов — N значений λ_i и константа C . Для их определения должны быть использованы $N+1$ уравнений. Путем подстановки (7) в (13) получаются N уравнений: $\alpha \mathbf{R} \boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{G} \boldsymbol{\Psi}^T \boldsymbol{\Lambda} + C \mathbf{t}_0 - \delta \mathbf{t}$.

Вводя обозначение матрицы $\mathbf{S} = \mathbf{G} \boldsymbol{\Psi}^T$, получаем:

$$(\mathbf{S} - \alpha \mathbf{R}) \boldsymbol{\Lambda} + C \mathbf{t}_0 = \delta \mathbf{t}. \quad (15)$$

Регуляризирующий член $\alpha \mathbf{R}$ в случае независимых и равнооточных данных принимает вид $\alpha \sigma^2 \mathbf{I}$ (где σ — среднеквадратичное отклонение), а при абсолютно точных данных становится равным нулю.

В уравнении (15) $\boldsymbol{\Lambda}$ — вектор неизвестных коэффициентов λ_i ; \mathbf{t}_0 — вектор времен пробега по трассам в модели начального приближения; \mathbf{S} — лучевая матрица с элементами

$$S_{ij} = \iint \psi_i(\mathbf{r}) G_j(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \frac{1}{2\pi} \iint_{L_i, L_j} \ln|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| \frac{ds_i}{V_0} \frac{ds_j}{V_0}. \quad (16)$$

Для решения системы уравнений (13) необходимо еще одно уравнение. Оно получается из условия $m = \text{const}$ при $|\mathbf{r}| \rightarrow \infty$. При $|\mathbf{r}| \rightarrow \infty$ базисные функции (14) стремятся к бесконечности как

$\frac{\ln \rho}{2\pi} \int_{L_{0i}} \frac{ds_i}{V_0(\mathbf{r}_i)} = \frac{t_{0i} \ln \rho}{2\pi}$. Для того чтобы в соответствии с (13) m была конечной при $|\mathbf{r}| \rightarrow \infty$, необходимо, чтобы выполнялось $\sum_i \lambda_i t_{0i} = 0$ или

$$\boldsymbol{\Lambda}^T \mathbf{t}_0 = 0. \quad (17)$$

Уравнения (15) и (17) образуют систему из $N+1$ уравнений для определения $N+1$ неизвестных коэффициентов — N значений λ_i и константы C .

Базисные функции (14) и элементы лучевой матрицы (16) в виде интегралов по одному (i -му) и двум лучам (i -му и j -му) могут быть вычислены как численно, так и аналитически. Возможность вычисления базисных функций и элементов лучевой матрицы аналитически является одним из преимуществ рассматриваемого метода Дитмара — Яновской.

2.3. Применение метода поверхностно-волновой томографии

Метод поверхностно-волновой томографии применяется в области сейсмологии с 1980-х годов (Левшин и др., 1987; Yanovskaya and Ditmar, 1990) для изучения строения земной коры и верхней мантии. С конца 1990-х годов метод начинает также применяться за рубежом и для решения инженерных задач (Long et al., 1999; Long and Kocaoglu, 2001). В последнее время среди работ зарубежных авторов встречается все больше статей о методе поверхностно-волновой томографии и его применении для решения инженерных задач на суше и в акваториях (Alyousuf et al., 2017; Boiero et al., 2013; Bohlen et al., 2004; Ikeda and Tsuji, 2018; Klein et al., 2005; Kugler et al., 2007; Long and Kocaoglu, 2001; Rector et al., 2015). Среди трудов отечественных авторов есть интересные статьи в области инженерной геофизики об использовании томографии поверхностных волн для оценки параметров водоемов (Буров и др., 2015; Преснов и др., 2019; Presnov et al., 2016).

Поверхностно-волновая томография позволяет получать 3D-модели среды, обладает потенциально лучшим пространственным разрешением, чем широко используемый метод обработки поверхностных волн MASW (Ponomarenko et al., 2019). Перспективы использования метода связаны также с возможностью удаленного изучения, не требующего размещения приборов непосредственно над исследуемой зоной (расстановка приемников и источников проводится на удаленных профилях, частично или полностью совпадающих с периметром зоны) (Alyousuf et al., 2017). Поверхностно-волновая томография может быть также эффективной при проведении площадных инженерно-геофизических исследований на морском шельфе с донными станциями (Polovkov et al., 2018; Ponomarenko et al., 2019; Roslov et al., 2014; Ryzhkov et al., 2015), поскольку позволяет расставить регистрирующие устройства по периметру площадки небольшого размера (например, 500 × 500 м), а затем выполнить отстрел. Зарегистрированная информация при этом служит для получения трехмерной скоростной модели среды. Тем не менее в подавляющем большинстве работ метод MASW используется чаще метода поверхностно-волновой томографии.

3. Моделирование данных

3.1. Оценка корректности метода

Для расчета скорости по методу поверхностно-волновой томографии при условии слабонеоднородной по горизонтали среды используется приближение, согласно которому лучи считаются прямыми (Long and Kocaoglu, 2001; Яновская, 2015). Это приближение противоречит одному из основополагающих принципов сейсморазведки — принципу Ферма, который говорит о том, что форма сейсмического луча совпадает с траекторией, вдоль которой время пробега волны минимально (Бондарь, 2003). Из этого принципа следует, что лучи будут прямыми, если среда однородная и изотропная. Реальные среды почти всегда неоднородные, а в условиях, характерных для верхней части разреза, сильно неоднородные, поэтому лучи становятся криволинейными.

Для того чтобы продемонстрировать корректность работы алгоритма поверхностно-волновой томографии на прямых лучах без учета принципа Ферма (по ме-

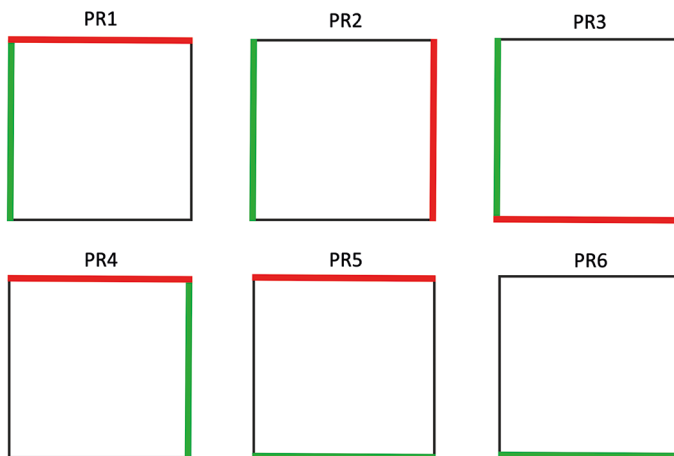


Рис. 1. Схема взаимного расположения источников и приемников при проведении моделирования. Красные линии — источники, зеленые линии — приемники

тоту Дитмара — Яновской, реализованному на языке MATLAB), было проведено тестирование с использованием синтетических данных, полученных в программных пакетах Tesseral (TESSERAL Technologies Inc) и X-Tomo (ООО «Икс-Гео»). Так как 3D-моделирование поверхностных волн является довольно трудоемкой задачей, при тестировании использовался принципиально схожий подход межскважинной томографии на прямых волнах с учетом искривления лучей.

Для проведения моделирования были выбраны 6 расстановок (рис. 1), сочетание которых позволит в дальнейшем сравнить между собой более сложные расстановки. Для моделирования также была создана модель среды со скоростью 1750 м/с (рис. 2), которая содержит в себе локальные неоднородности с различными значениями скорости распространения волн: 2000, 1900, 1600 и 1500 м/с. Размер модели: 100 м в ширину, 100 м в глубину. Размер локальных включений: 15 м в ширину, 15 м в глубину. Шаг между источниками 1 м, шаг между приемниками 1 м. Источники и приемники расставлялись по разным сторонам модели согласно выбранным расстановкам, представленным на рис. 1. Параметры моделирования: частота 500 Гц, время регистрации 0.15 с, шаг дискретизации 0.25 мс. Пикирование проводилось по первым вступлениям.

Моделирование в X-Tomo проводилось для той же модели, но расстановка источников и приемников производилась не по выбранным расстановкам, а по всему периметру модели с шагом в 1 м.

Принципиальное отличие моделирования синтетических данных в X-Tomo от моделирования в Tesseral 2D заключается в следующем. Tesseral строит волновое поле методом конечных разностей, решая с некоторой точностью волновое уравнение. Поэтому для тестирования алгоритма томографии времена первых вступлений были получены при помощи пикировки. X-Tomo строит сейсмические лучи с учетом основных принципов и законов геометрической сейсмологии, решая лучевые уравнения в неоднородной среде, а также определяет времена хода волны по по-

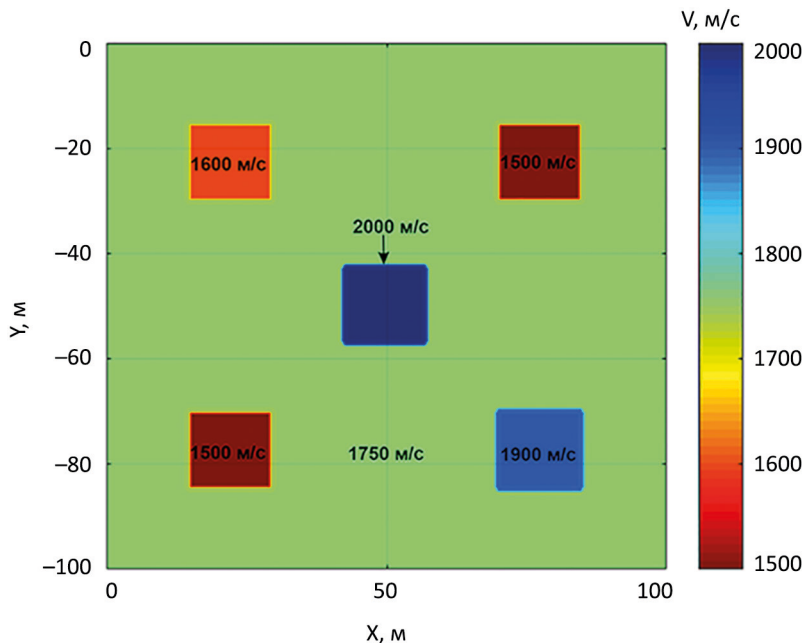


Рис. 2. Изображение модели, созданной для тестирования алгоритма

строенным лучам. Кроме того, X-Томо позволяет решать томографическую задачу по построенным лучам.

Первые вступления волн по данным, полученным в Tesseract, были пропикированы по расстановкам PR1, PR2, PR4, PR5, PR6 (в соответствии с рис. 1). Расстановка PR3 была пропикирована с ошибками, поэтому было решено не использовать данные по этой расстановке в дальнейшей обработке. Сравнение исходной модели и полученного результата показано на рис. 3. Отсутствие данных по PR3 дает растяжение аномалии в левом нижнем углу (там, где и отсутствуют данные по PR3). Для уменьшения времени расчета томографического результата пропикированные времена равномерно прорежены: были оставлены лишь те трассы, координаты источника и приемника для которых кратны 10 м.

Результаты восстановления модели среды по данным, полученным в программе X-Томо, представлены на рис. 4. Полученные с помощью программы времена хода волн по рассчитанным лучам были прорежены, как и в предыдущем примере (были оставлены лишь трассы, координаты источника и приемника для которых кратны 10 м). Прореживание трасс было проведено для уменьшения времени расчета томографии.

Проведенные тесты алгоритма поверхностно-волновой томографии позволили получить распределения скоростей, которые вполне отвечают заданной модели, а также результату томографии в программе X-Томо, даже несмотря на прореживание трасс, которое приводит к сглаживанию результатов (по сравнению с заданной моделью и результатом по полному набору трасс, полученному в X-Томо). Это позволяет утверждать, что алгоритм работает корректно, а приближение о прямолинейности лучей существенно не влияет на результат восстановления среды.

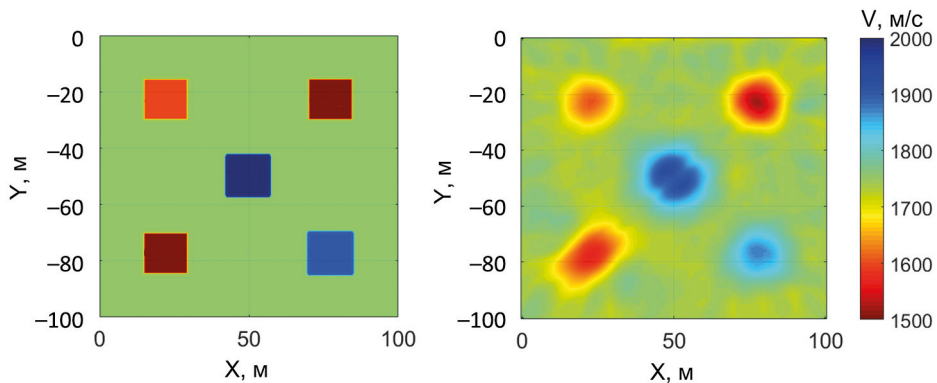


Рис. 3. Решение обратной задачи с применением алгоритма поверхностно-волновой томографии по синтетическим данным, полученным в программе Tesserat 2D. Слева — заданная модель. Справа — результат томографии по методу Дитмара — Яновской

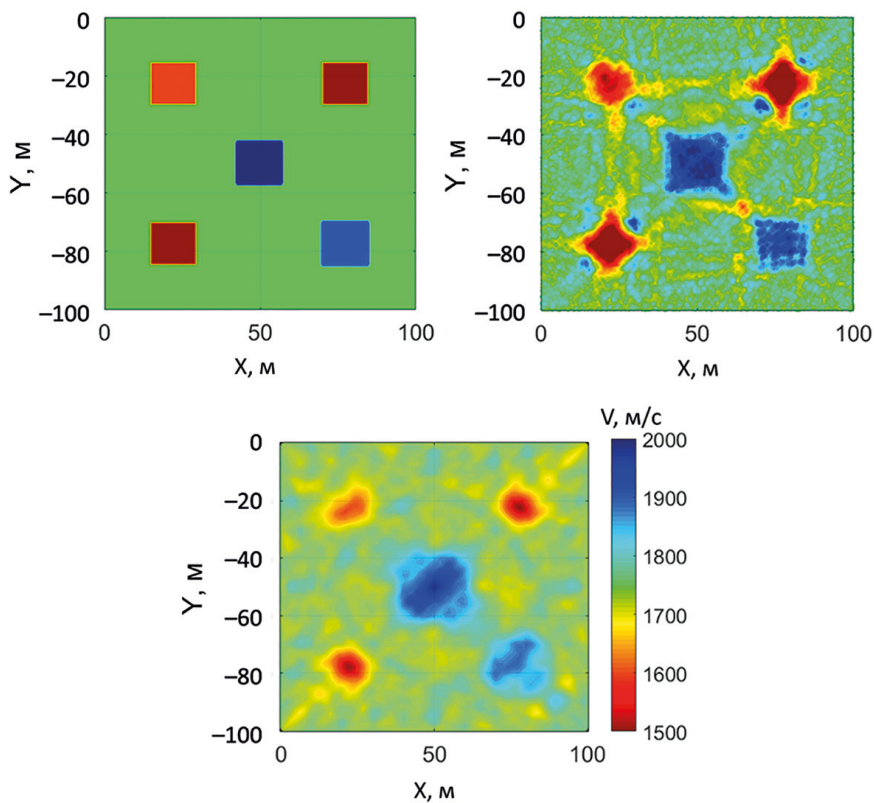


Рис. 4. Решение обратной задачи с применением алгоритма поверхностно-волновой томографии по синтетическим данным, полученным в программе X-Tomo. Слева вверху — заданная модель. Снизу — результат томографии по методу Дитмара — Яновской. Справа сверху — результат томографии в самой программе X-Tomo по всем рассчитанным лучам

3.2. Выбор системы наблюдения

В методе сейсмической томографии качество восстановления распределений скорости или иных параметров среды зависит от покрытия волновыми трассами исследуемой области, а именно от того, каким образом расположены трассы, насколько плотно они покрывают исследуемую область. Очевидно, что не всегда возможно расположить источники и приемники таким образом, чтобы равномерно покрыть трассами исследуемую область, а также невозможно до бесконечности увеличивать количество трасс.

В случае поверхностно-волновой томографии источники и приемники располагаются на поверхности земли, а исследуемой областью является участок земли, ограниченный приборами. Основными параметрами систем наблюдения при этом являются шаг между источниками, шаг между приемниками и расположение приемной и возбуждающей линий друг относительно друга.

Рассмотрим данные о временах прихода прямой волны, полученные в программе X-Томо (см. подразд. 3.1). За счет объединения данных по разным расстановкам или «профилям» (в соответствии с рис. 1) используем различные варианты расположения источников и приемников и сделаем выводы о том, какая система наблюдений позволит наиболее качественно и с наименьшими затратами восстановить изображение среды.

Сначала рассмотрим зависимость формы аномалий от направления лучей на примере двух отдельных профилей PR2 (рис. 5 и 6) и PR5 (рис. 7 и 8). В ходе сравнения полученных изображений прослеживается четкая зависимость между преимущественным направлением лучей и формой аномалий. Так, на рис. 6 видно, что аномалии вытягиваются в направлении от источников к приемникам. Аналогичная ситуация наблюдается на рис. 8. Главный вывод заключается в том, что изучаемая область должна быть равномерно покрыта лучами (трассами) со всех направлений, чтобы избежать искажения формы аномалий (изображений исследуемой среды).

Перейдем теперь к рассмотрению комбинаций расстановок. Для сравнения были выбраны комбинации, которые образуют букву «Г» (рис. 9 и 10), букву «П» (рис. 11 и 12) и «квадрат» (расстановка по всему периметру) (рис. 13 и 14).

Сравнение полученных результатов при расстановке буквой «Г» (рис. 10) и буквой «П» (рис. 12) показало, что расстановка буквой «П» дает более детальную

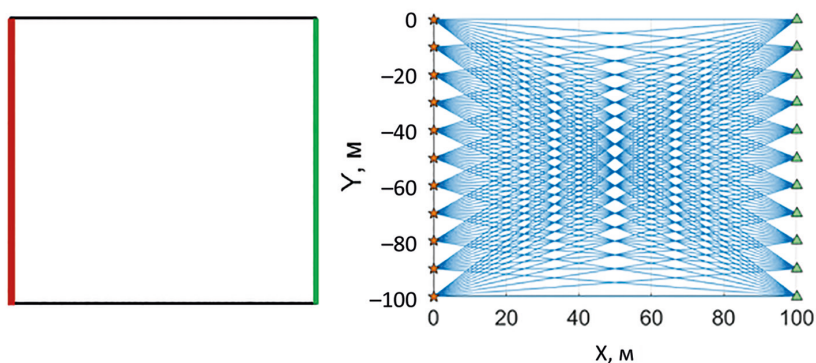


Рис. 5. Схема расположения источников (указаны красным цветом) и приемников (указаны зеленым цветом), а также расположение лучей (справа) при моделировании PR2

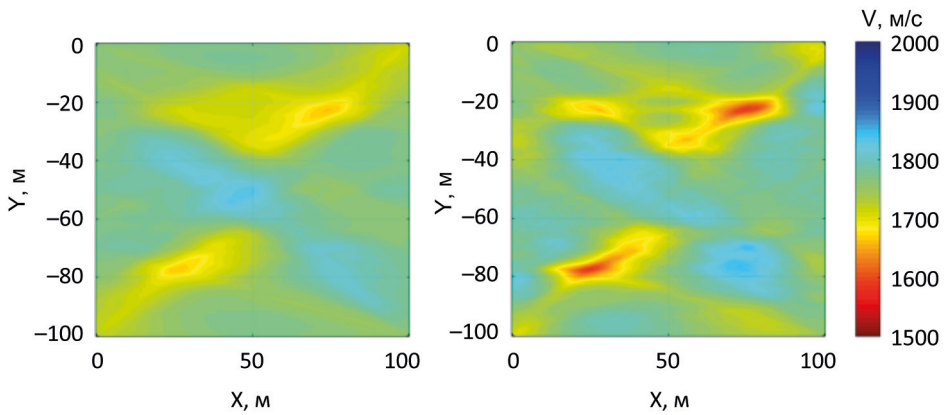


Рис. 6. Восстановление скоростей с применением алгоритма по данным с PR2. Слева: шаг между источниками ($\Delta ПВ$) — 10 м, между приемниками ($\Delta ПП$) — 10 м; справа: $\Delta ПВ$ — 2 м, $\Delta ПП$ — 2 м

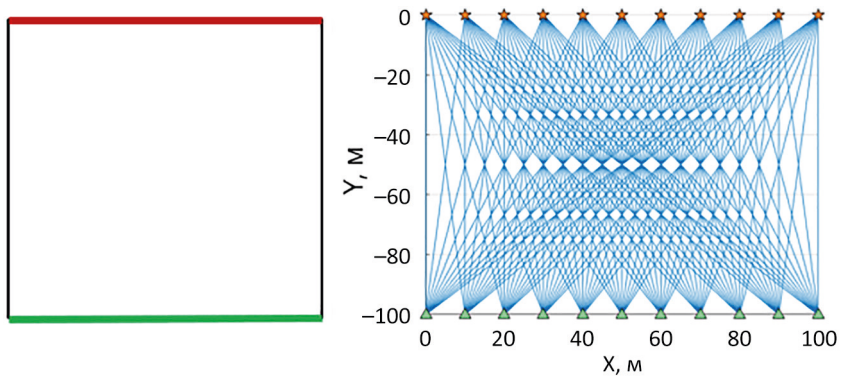


Рис. 7. Схема расположения источников (указаны красным цветом) и приемников (указаны зеленым цветом), а также расположение лучей (справа) при моделировании PR5

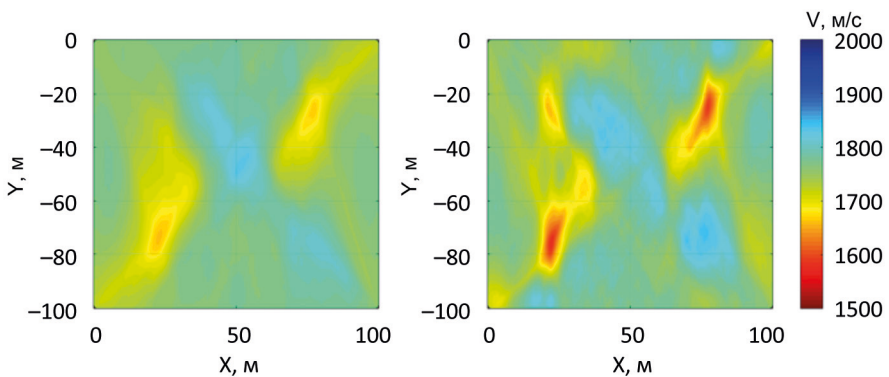


Рис. 8. Восстановление скоростей с применением алгоритма по данным с PR5. Слева: шаг между источниками ($\Delta ПВ$) — 10 м, между приемниками ($\Delta ПП$) — 10 м; справа: $\Delta ПВ$ — 2 м, $\Delta ПП$ — 2 м

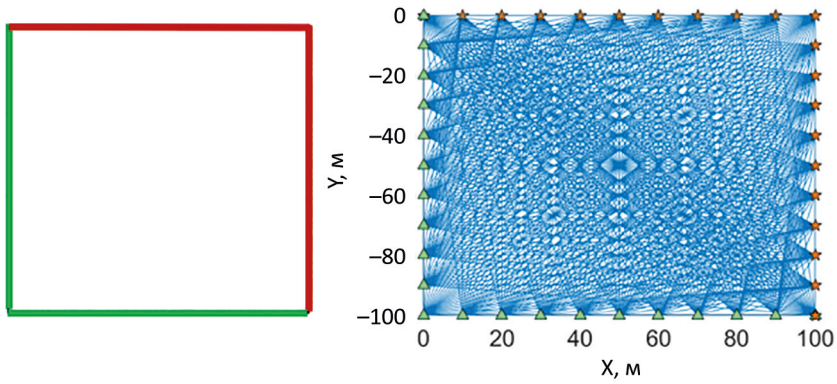


Рис. 9. Схема расположения источников (указаны красным цветом) и приемников (указаны зеленым цветом), а также расположение лучей (справа) при рассмотрении комбинации в виде буквы «Г»

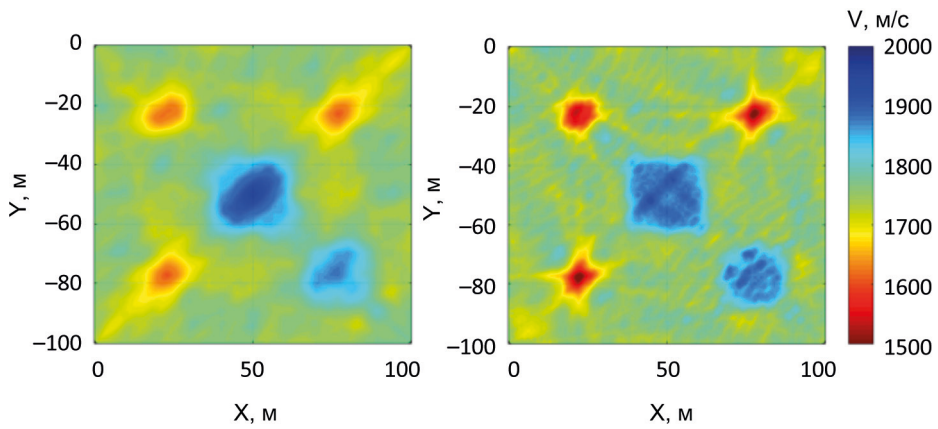


Рис. 10. Восстановление скоростей с применением алгоритма при рассмотрении комбинации в виде буквы «Г». Слева: шаг между источниками (ΔПВ) — 10 м, между приемниками (ΔПП) — 10 м; справа: ΔПВ — 2 м, ΔПП — 2 м

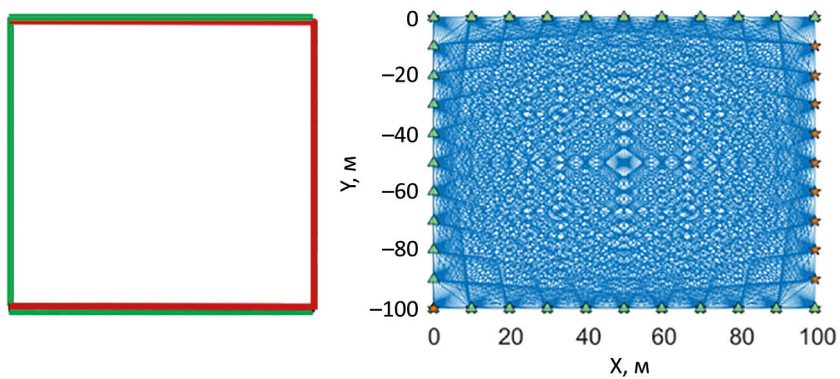


Рис. 11. Схема расположения источников (указаны красным цветом) и приемников (указаны зеленым цветом), а также расположение лучей (справа) при рассмотрении комбинации в виде буквы «П»

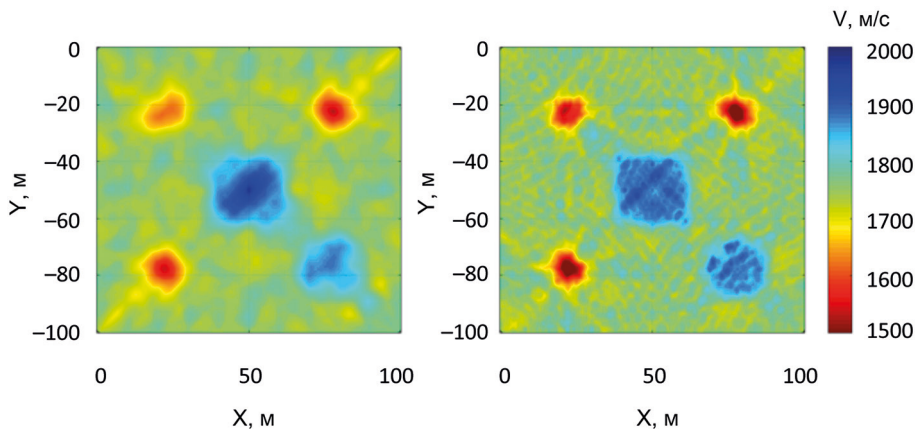


Рис. 12. Восстановление скоростей с применением алгоритма при рассмотрении комбинации в виде буквы «П». Слева: шаг между источниками ($\Delta ПВ$) — 10 м, между приемниками ($\Delta ПП$) — 10 м; справа: $\Delta ПВ$ — 2 м, $\Delta ПП$ — 2 м

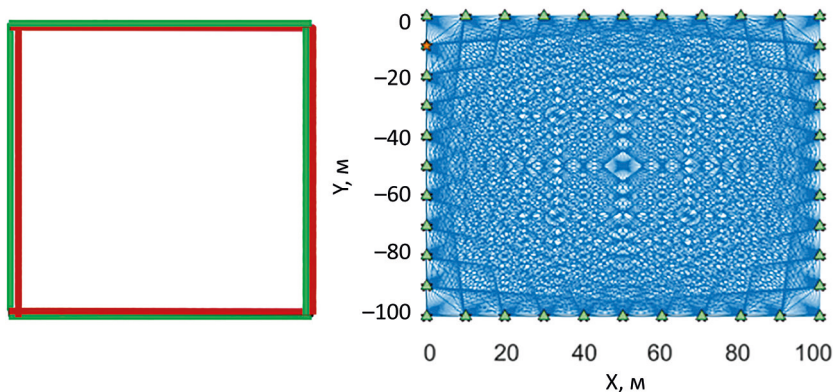


Рис. 13. Схема расположения источников (указаны красным цветом) и приемников (указаны зеленым цветом), а также расположение лучей (справа) при рассмотрении комбинации «квадрат»

картину, чем расстановка буквой «Г», за счет большего количества лучей. Однако эта разница не является существенной. Сравнение же полученных результатов при расстановке буквой «П» (рис. 12) и расстановке «квадратом» (рис. 14) показало, что полученные изображения практически идентичны.

В случае расстановки «квадратом» дополнительных лучей, не дублирующих друг друга и пересекающих исследуемую область, не появляется. Добавление лучей вдоль граней области, как и наличие дублирующих лучей, почти не влияет на восстанавливаемую скоростную картину внутри области. Следовательно, расстановка буквой «П» может использоваться вместо полной расстановки «квадрат» как для экономии времени сбора информации, так и для уменьшения количества обрабатываемых лучей при расчете томографии.

Подводя итог сравнению расстановок можно сделать вывод, что для получения вполне удовлетворительного результата будет достаточно использовать расстановку буквой «Г», но при необходимости увеличения детальности восстанавливаемой

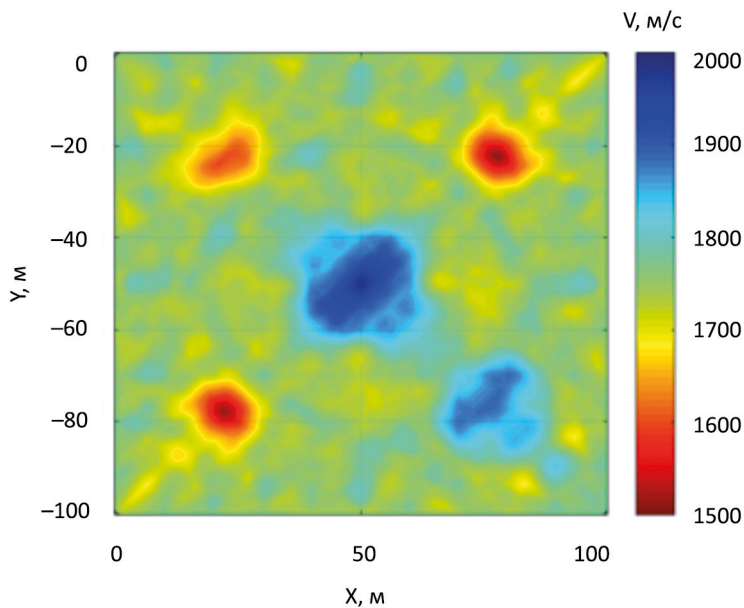


Рис. 14. Восстановление скоростей с применением алгоритма при рассмотрении комбинации «квадрат». Шаг между источниками — 10 м, между приемниками — 10 м

картины не обязательно прибегать к расстановке «квадрат», так как буква «П» позволяет при меньших ресурсах получить схожий результат.

3.3. Параметр регуляризации

Параметр регуляризации — это один из входных параметров, необходимых для работы алгоритма поверхностно-волновой томографии (см. уравнения (4), (6) и (15)). Величина данного параметра подбирается эмпирическим путем. По умолчанию применяемая реализация алгоритма поверхностно-волновой томографии по методу Дитмара — Яновской использует значение параметра 0.05. Для сравнения протестируем алгоритм на значениях: 0.001, 0.01, 0.1, 1. Для тестирования используем времена прихода волн по лучам, полученным в программе X-Томо.

Анализ результатов при изменении параметра регуляризации показывает (рис. 15), что при увеличении параметра общая картина размывается, контуры основных аномалий становятся менее четкими. С уменьшением параметра регуляризации происходит выделение основных аномалий, в том числе и менее контрастных, но также и артефактов, что ухудшает картину. Для каждой конкретной задачи можно подобрать наиболее подходящее значение параметра.

При увеличении количества трасс (рис. 16) вместе с лучшим восстановлением формы и скоростных значений аномалий происходит значительное выделение мелких аномалий-артефактов, что уменьшает качество восстановления. Увеличение значения параметра позволяет улучшить результат, сглаживая мелкие аномалии-артефакты.

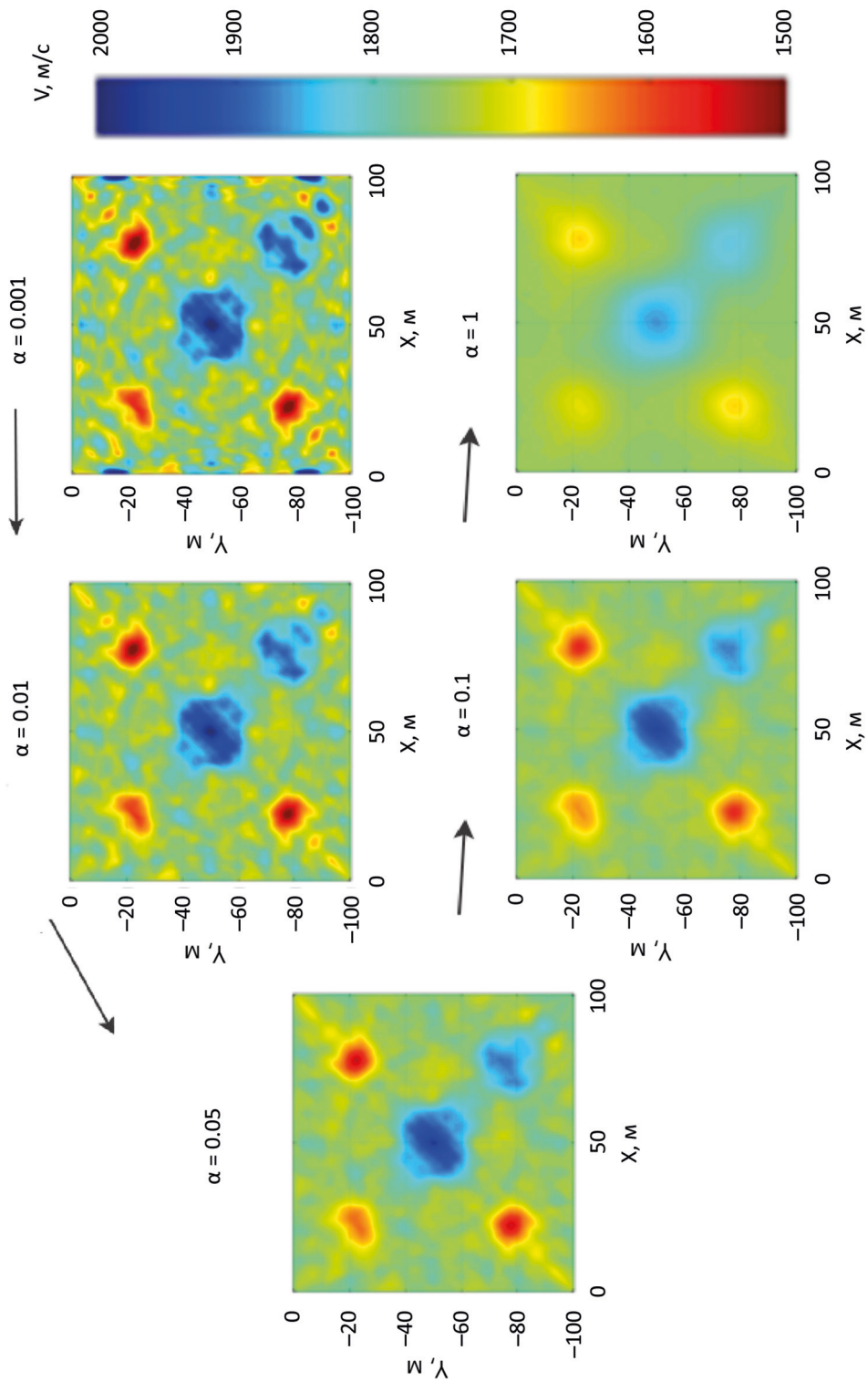


Рис. 15. Влияние изменения параметра регуляризации на результат восстановления скорости. Шаг между источниками — 10 м, между приемниками — 10 м. Расстановка в виде буквы «П» (см. подразд. 3.2). Стрелкой показано направление изменения параметра регуляризации

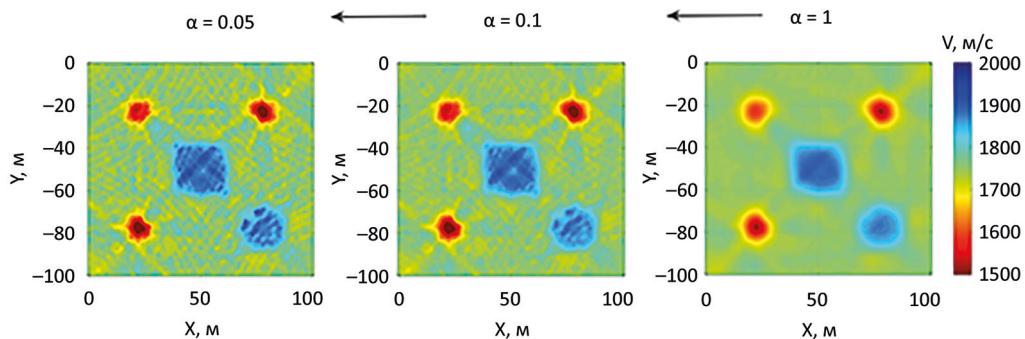


Рис. 16. Влияние изменения параметра регуляризации на результат восстановления скорости. Шаг между источниками — 2 м, между приемниками — 2 м. Расстановка в виде буквы «П» (см. подразд. 3.2). Стрелкой показано направление изменения параметра регуляризации

Необходимо отметить, что в проведенной работе не было рассмотрено влияние ошибок, связанных с пикировкой времени прихода волны, наличием случайного шума во входных данных. Тем не менее алгоритм и его программная реализация имеют внутри себя механизм регуляризации, в котором возможен учет дисперсии времени прихода волны.

Подводя итог тестированию влияния параметра регуляризации на качество восстановления скоростной картины, можно сделать несколько выводов:

- при большом количестве трасс увеличение значения параметра регуляризации позволяет улучшить качество восстановления скоростной картины;
- подбирая значение параметра регуляризации, можно улучшать качество восстановления тех или иных локальных составляющих (более или менее контрастных) при восстановлении скоростной картины.

3.4. Разрешающая способность метода

Результатом решения томографической задачи никогда не является локальное значение скорости в конкретно заданной точке, это всегда результат осреднения по некоторой области. Небольшие детали могут быть размыты или вообще не отобразятся, а крупные аномалии могут быть искажены.

Разрешающая способность томографии зависит от густоты и взаимного расположения сейсмических трасс. Один из универсальных способов проверки разрешающей способности метода — это тест шахматной доски (Яновская, 2015).

Суть теста состоит в том, что двумерная или трехмерная среда разбивается на ячейки и создается синтетическая модель, в которой каждой ячейке присваивается положительное или отрицательное значение скорости в соответствии с последовательностью шахматной доски. Для такой синтетической модели по исходному набору трасс рассчитываются времена пробега волн. Затем с применением алгоритма, разрешающую способность которого необходимо выяснить, строится решение задачи по рассчитанным временам пробега. Результат сравнивают с исходной моделью. В том случае, если расположение положительных и отрицательных аномалий совпадает, можно сделать вывод, что аномалии схожего с ячейками размера также будут выделяться при помощи тестируемого алгоритма и на реальных данных.

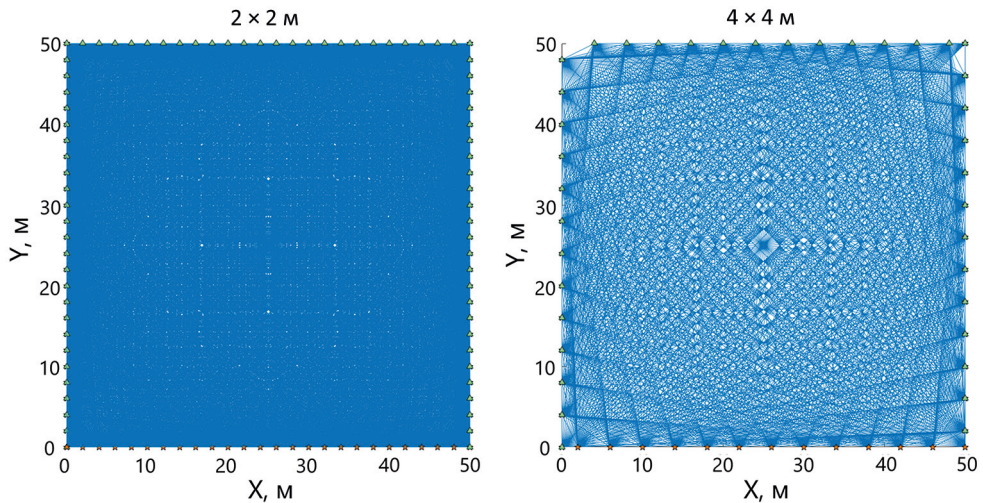


Рис. 17. Изображения трасс, по которым рассчитывались времена пробега для шахматного теста. Слева — шаг между источниками ($\Delta ПВ$) — 2 м, между приемниками ($\Delta ПП$) — 2 м; справа — $\Delta ПВ$ — 4 м, $\Delta ПП$ — 4 м

Для того чтобы говорить о том, какие аномалии будут отображаться и в каких участках среды для данного набора трасс они будут проявляться, необходимо провести серию тестов с разным размером ячеек. Достоинство этого подхода в том, что он позволяет надежно оценить разрешающую способность метода (Яновская, 2015).

Подобный шахматный тест был проведен для тестируемого алгоритма поверхностно-волновой томографии. Была выбрана модель, представляющая собой квадрат со сторонами 50 м. Для проведения теста была выбрана расстановка источников и приемников буквой «П» как наиболее оптимальная среди расстановок. Для того чтобы приблизительно оценить влияние количества трасс на разрешающую способность, тестирование проводилось для двух расстановок с разным значением шага между приборами: в первом случае шаг между источниками, а также между приемниками был равен 2 м (2×2 м), во втором случае — 4 м (4×4 м) (рис. 17). Для тестирования были выбраны следующие модели шахматной доски с разным размером ячеек: 10×10 , 5×5 , 4×4 , 2×2 м (рис. 18).

Качественный анализ результатов шахматного теста (рис. 18) для расстановки 4×4 м показывает, что аномалии размером 10×10 м восстанавливаются хорошо, аномалии размером 5×5 м также выделяются, но форма начинает искажаться, аномалии размером 4×4 м искажены сильнее, а аномалии размером 2×2 м выделить крайне трудно, так как наблюдаются только их размытые очертания.

Расстановка 2×2 м хорошо восстанавливает форму аномалий размером 10×10 м и 5×5 м, но аномалии размером 4×4 м уже немного теряют форму. Для аномалий размером 2×2 м в целом можно проследить основную закономерность в восстановлении скоростей.

По итогам проведенного теста можно сделать вывод, что обе расстановки позволяют восстановить распределение аномалий с характерным размером, большим или равным шагу расстановки приборов. Полученный результат согласуется с результатом, представленным в книге Т.Б. Яновской (Яновская, 2015).

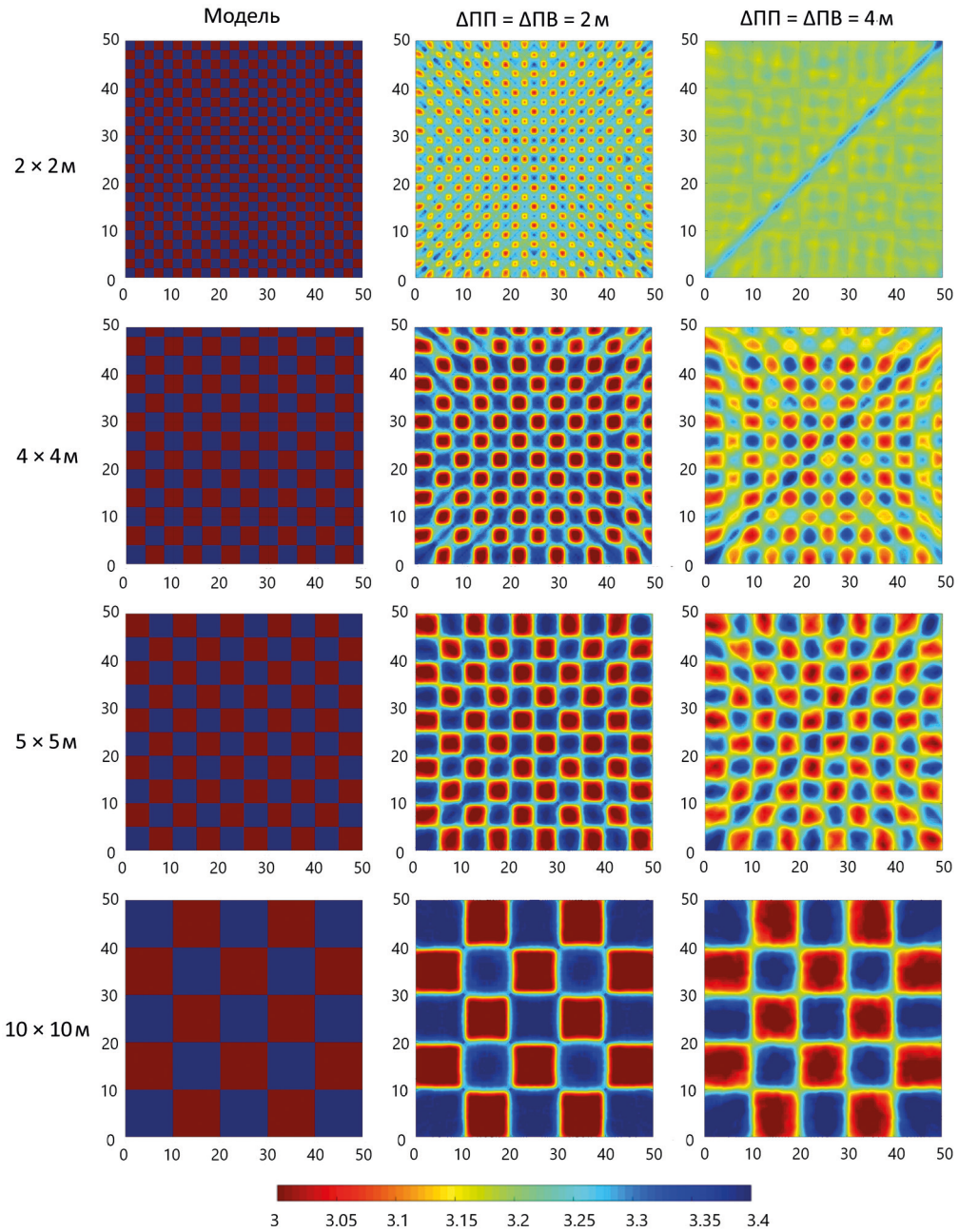


Рис. 18. Шахматный тест для поверхностно-волновой томографии. Размер каждой модели 50×50 м, расстановка источников и приемников в виде буквы «П». Левая колонка: тестовые модели с разным размером аномалий (от 2×2 до 10×10 м); центральная колонка: результат томографии, полученный с шагом $\Delta_{ПВ} = \Delta_{ПП} = 2$ м; правая колонка: результат томографии, полученный с шагом $\Delta_{ПВ} = \Delta_{ПП} = 4$ м. Скорость в палитре изменяется от 3 до 3.4 км/с

Разрешающая способность метода напрямую связана с количеством трасс, покрывающих исследуемую область: чем чаще шаг между ПП и ПВ, тем больше трасс, тем выше возможная детальность. В этом заключается одно из отличий поверхностно-волновой томографии от метода MASW, в котором горизонтальная разрешающая способность ограничена длиной приемной расстановки (Park et al., 1999).

Необходимо отметить, что существует принципиальное физическое ограничение разрешающей способности, связанное с радиусом первой зоны Френеля. Если характерный размер неоднородности меньше радиуса первой зоны Френеля, разделение двух объектов между собой считается невозможным. Для прямых лучей радиус первой зоны Френеля вычисляется по формуле (Cervený, 2005)

$$r = \sqrt{\lambda L}/2, \quad (18)$$

где λ — длина волны; L — длина луча.

При рассмотрении шахматного теста было проведено лишь тестирование разрешающей способности самого алгоритма в лучевом приближении. В случае реального моделирования необходимо учитывать разрешающую способность, определяемую радиусом первой зоны Френеля. Тем не менее известно, что при достаточно плотном и всестороннем лучевом покрытии исследуемой области (расстояние между источниками и приемниками меньше или равно характерному размеру аномалии; источники и приемники располагаются со всех сторон исследуемой области) качественное восстановление неоднородностей возможно и в случае, когда их характерный размер меньше радиуса первой зоны Френеля (Шишкина и др., 2015).

В рассмотренном выше примере с моделированием синтетических данных в программных пакетах Tesseral и X-Tomo используется достаточно высокая частота (500 Гц), характерное значение скорости равно 1750 м/с, характерная длина луча равна 100 м. В таком случае характерный радиус первой зоны Френеля, вычисленный по формуле (18), оказывается приблизительно равным 9.5 м. Характерный размер неоднородности в рассмотренном примере равен 15 м, таким образом, результат восстановления должен быть близок к теоретически достижимому в лучевом методе.

В случае моделирования полей поверхностных волн и при работе с реальными данными также необходимо оценивать интервал глубин возможного исследования среды. Проникновение волнового поля поверхностной волны в глубину определяется длиной волны, таким образом, интервал глубин зависит от набора длин волн, которые используются в эксперименте, т.е. от частотного состава сигнала и свойств самой среды. Изучение разрешающей способности по глубине не рассмотрено в данной работе и требует отдельного исследования.

4. Заключение

В ходе выполнения работы был успешно протестирован программный код, реализующий метод поверхностно-волновой томографии (Дитмара — Яновской).

Для метода поверхностно-волновой томографии было показано:

— приближение о прямолинейности лучей существенным образом не влияет на результат восстановления скоростной модели, следовательно, алгоритмы, осно-

ванные на этом приближении, можно использовать для обработки реальных сейсмических данных;

- параметр регуляризации позволяет контролировать контрастность восстановления скоростной картины, что можно использовать для выделения различных по размеру и контрастности аномалий;

- скоростные аномалии, восстанавливаемые с использованием поверхностно-волновой томографии, вытягиваются вдоль преимущественного направления лучей, поэтому рекомендуется просвечивать исследуемую область во всех направлениях равномерно;

- оптимальная система наблюдений для площадных исследований — это расстановка источников и приемников по системе наблюдений типа «Г» (см. рис. 9) или «П» (см. рис. 11) в зависимости от возможностей проведения исследования;

- разрешающая способность метода напрямую зависит от количества лучей. В отличие от метода MASW она не зависит от размера приемной расстановки, а определяется шагами между источниками и приемниками. Для повышения разрешающей способности метода рекомендуется увеличивать количество лучей за счет уменьшения шага между пунктами приема и пунктами взрыва. В то же время необходимо учитывать физическую разрешающую способность, определяемую радиусом первой зоны Френеля. Характерный размер предполагаемых для определения неоднородностей должен быть больше радиуса первой зоны Френеля.

Перспективы использования метода поверхностно-волновой томографии связаны как с потенциально лучшим пространственным разрешением в сравнении с методом MASW, так и с возможностью удаленного изучения объектов, когда не требуется проводить исследования непосредственно над объектами: источники и приемники расставляются по периметру исследуемой области.

В настоящей работе не было рассмотрено влияние ошибок, связанных с пикировкой времени прихода волны, наличием случайного шума во входных данных, не изучалась разрешающая способность метода по глубине, а также не учитывались изменения разрешающей способности при разном расстоянии между соседними источниками и приемниками при неравномерном лучевом покрытии. Авторы планируют рассмотреть эти вопросы в продолжении настоящей работы.

Для верификации преимуществ метода поверхностно-волновой томографии и рассмотренного алгоритма планируется провести серию экспериментов по обработке реальных данных на суше и в акваториях.

Литература

- Бондарь, В. И. (2003). *Основы сейсморазведки*. Екатеринбург: Издательство УГГА.
- Буров, В. А., Сергеев, С. Н., Шуруп, А. С., Щербина, А. В. (2015). Томографическое восстановление характеристик дна мелкого моря. *Акустический журнал*, 61 (5), 583–595. <https://doi.org/10.7868/S0320791915050068>
- Левшин, А. Л., Яновская, Т. Б., Ландер, А. Л. (1987). *Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной земле*. М.: Наука.
- Преснов, Д. А., Собисевич, А. Л., Груздев, П. Д., Игнатьев, В. И., Коньков, А. И., Мореев, А. Ю., Тарасов, А. В., Шувалов, А. А., Шуруп, А. С. (2019). Томографическая оценка параметров водоёма

- при наличии ледового покрова с использованием сейсмоакустических излучателей. *Акустический журнал*, 65 (5), 688–698. <https://doi.org/10.1134/S0320791919050186>
- Шишкина, М. А., Фокин, И. В., Тихоцкий, С. А. (2015). К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии. *Сейсмические технологии*, 1, 5–21.
- Яновская, Т. Б. (2015). *Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях*. СПб.: Наука.
- Alyousuf, T., Rector, J., Newman, G. and Petrov, P. (2017). Surface-wave tomography to resolve water table: Almond Orchard case study, Modesto, California. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 5407–5411. <https://doi.org/10.1190/segam2017-17588536.1>
- Bohlen, T., Kugler, S., Klein, G. and Theilen, F. (2004). 1.5D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion. *Geophysics*, 69, 330–344. <https://doi.org/10.1190/1.1707052>
- Boiero, D., Wiarda, E. and Vermeer, P. (2013). Surface and guided-wave inversion for near-surface modeling in land and shallow marine seismic data. *The Leading Edge*, 32 (6), 638–646. <https://doi.org/10.1190/tle32060638.1>
- Cerveny, V. (2005). *Seismic ray theory*. Cambridge: Cambridge University Press
- Ikeda, T. and Tsuji, T. (2018). Surface-wave tomography for near-surface characterization with continuous wavelet transform for two-station cross-correlation. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2531–2535. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2996939.1>
- Klein, G., Bohlen, T., Theilen, F., Kugler, S. and Forbriger, T. (2005). Acquisition and inversion of dispersive seismic waves in shallow marine environments. *Marine Geophys. Res.*, 26, 287–315. <https://doi.org/10.1007/s11001-005-3725-6>
- Kugler, S., Bohlen, T., Forbriger, T., Bussat, S. and Klein, G. (2007). Scholte-wave tomography for shallow-water marine sediments. *Geophys. Journal Int.*, 168 (2), 551–570. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03233.x>
- Long, L. T. and Kocaoğlu, A. H. (2001). Surface-Wave Group-Velocity Tomography for Shallow Structures. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics (JEEG)*, 6 (2), 71–81.
- Long, L. T., Kocaoğlu, A. H., Doll, W. E., Chen, X. and Martin, J. (1999). Surface-wave group-velocity tomography for shallow structures at a waste site. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 496–499. <https://doi.org/10.1190/1.1821062>
- Park C., Miller R. and Xia J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64 (3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Polovkov, V. V., Nikitin, A. S., Popov, D. A., Maev, P. A., Birukov, E. A. and Tokarev, M. Y. (2018). Gas-saturated sediments study in the upper part of the geological medium using ocean bottom nodes. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800516>
- Ponomarenko, A., Polovkov, V., Popov, D. and Kashtan, B. (2019). The Advantages of Using Surface Wave Tomography in the Marine Studies of the Upper Part of the Seismic Section. In: *Marine Technologies*, April 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901819>
- Presnov D. A., Sobisevich A. L. and Shurup A. S. (2016). Model of the geoacoustic tomography based on surface-type waves. *Physics of Wave Phenomena*, 24 (3), 249–254. <https://doi.org/10.3103/S1541308X16030109>
- Rector, J. W., Pfeiffe, J., Hodges, S., Kingman, J. and Sprott, E. (2015). Tomographic imaging of surface waves: A case study from the Phoenix Mine, Battle Mountain, Nevada. *The Leading Edge*, 34 (11), 1360–1364. <https://doi.org/10.1190/tle34111360.1>
- Roslov, Y. V., Merezhko, A. A., Polovkov, V. V., Popov, D. A. and Zhemchuzhnikov, E. G. (2014). Multicomponent seismic survey in transition zone of Pechora Bay with node system Turtle-500. In: *6th EAGE Saint Petersburg Int. Conf. and Exhibition*, April, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140213>
- Ryzhkov, V. I., Sergeev, K. S., Roslov, Y. V., Polovkov, V. V. and Elistratov, A. V. (2015). Engineering surveys by the method of the cableless ocean bottom seismic. In: *11th EAGE Int. Scientific and Practical Conf. and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics*, Sep. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412223>
- Socco, L., Foti, S. and Boiero, D. (2010). Surface-wave analysis for building near-surface velocity models — established approaches and new perspectives. *Geophysics*, 75 (5), 75A83–75A102. <https://doi.org/10.1190/1.3479491>

Контактная информация:

Левин Илья Сергеевич — levinilia19@gmail.com
Пonomаренко Андрей Валерьевич — a.v.ponomarenko@spbu.ru
Половков Вячеслав Владимирович — v.v.polovkov@gmail.com
Попов Дмитрий Андреевич — mail@dpopov-spb.ru
Троян Владимир Николаевич — vntroyan@mail.ru

On the method of surface-wave tomography and perspectives for its application in engineering seismic exploration

I. S. Levin¹, A. V. Ponomarenko^{1,2}, V. V. Polovkov^{1,2},
D. A. Popov^{1,2}, V. N. Troyan¹

¹ St Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St Petersburg, 199034, Russian Federation

² Integrated Marine Research Center of the St Petersburg State University,
24, ul. Odoevskogo, St Petersburg, 199155, Russian Federation

For citation: Levin, I. S., Ponomarenko, A. V., Polovkov, V. V., Popov, D. A., Troyan, V. N. (2022). On the method of surface-wave tomography and perspectives for its application in engineering seismic exploration. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 67 (2), 202–226. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.201> (In Russian)

The upper part of the seismic section is studied using refracted waves, as well as surface waves using the MASW method during engineering seismic surveys. This work considers relatively new near-surface approach that is actively used in seismology for studying the upper mantle and deep part of the earth's crust, the method of surface wave tomography. This method is of great practical interest, since it allows to obtain 3D subsurface models, and it potentially has better spatial resolution than the widely used MASW method. Also method allows conducting remote researches, without placing sources and receivers directly this above the studied area. Thus, the method is especially relevant for studying the subsurface under buildings, structures, and inaccessible zones. Within the framework of this work, tests of the developed algorithm for surface-wave tomography using direct rays were carried out on modeled data. The performance of the algorithm was assessed and the resolution of the method was estimated. Also the optimal observation schemes were considered as well as the influence of the regularization parameter value on the inversion result. Basing on the results of the current study, it can be concluded that the method of surface-wave tomography and its realization via the developed algorithm can be effectively used to solve engineering-geological problems both on land and shallow seas.

Keywords: engineering seismic exploration, surface waves, the upper part of the seismic section, near surface, seismic tomography.

References

Alyousuf, T., Rector, J., Newman, G. and Petrov, P. (2017). Surface-wave tomography to resolve water table: Almond Orchard case study, Modesto, California. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 5407–5411. <https://doi.org/10.1190/segam2017-17588536.1>

- Bohlen, T., Kugler, S., Klein, G. and Theilen, F. (2004). 1.5D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion. *Geophysics*, 69, 330–344. <https://doi.org/10.1190/1.1707052>
- Bondar, V.I. (2003). *Basics of Seismic Exploration*. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UGGA. (In Russian)
- Boiero, D., Wiarda, E. and Vermeer, P. (2013). Surface- and guided-wave inversion for near-surface modeling in land and shallow marine seismic data. *The Leading Edge*, 32 (6), 638–646. <https://doi.org/10.1190/tle32060638.1>
- Burov, V.A., Sergeev, S.N., Shurup, A.S. and Sherbina, A.V. (2015). Tomographic reconstruction of bottom characteristics on the shallow sea. *Akusticheskii zhurnal*, 61 (5), 583–595. <https://doi.org/10.7868/S0320791915050068> (in Russian)
- Cerveny, V. (2005). *Seismic ray theory*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ikeda, T. and Tsuji, T. (2018). Surface-wave tomography for near-surface characterization with continuous wavelet transform for two-station cross-correlation. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2531–2535. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2996939.1>
- Klein, G., Bohlen, T., Theilen, F., Kugler, S. and Forbriger, T. (2005). Acquisition and inversion of dispersive seismic waves in shallow marine environments. *Marine Geophys. Res.*, 26, 287–315. <https://doi.org/10.1007/s11001-005-3725-6>
- Kugler, S., Bohlen, T., Forbriger, T., Bussat, S. and Klein, G. (2007). Scholte-wave tomography for shallow-water marine sediments. *Geophys. Journal Int.*, 168 (2), 551–570. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03233.x>
- Levshin, A.L., Yanovskaya, T.B. and Lander, A.L. (1987). *Surface seismic waves in laterally-inhomogeneous earth*. M.: Nauka. (In Russian)
- Long, L.T. and Kocaoğlu, A.H. (2001). Surface-Wave Group-Velocity Tomography for Shallow Structures. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics (JEEG)*, 6 (2), 71–81.
- Long, L.T., Kocaoğlu, A.H., Doll, W.E., Chen, X. and Martin, J. (1999). Surface-wave group-velocity tomography for shallow structures at a waste site. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 496–499. <https://doi.org/10.1190/1.1821062>
- Park C., Miller R. and Xia J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64 (3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Polovkov, V.V., Nikitin, A.S., Popov, D.A., Maev, P.A., Birukov, E.A. and Tokarev, M.Y. (2018). Gas-saturated sediments study in the upper part of the geological medium using ocean bottom nodes. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800516>
- Ponomarenko, A., Polovkov, V., Popov, D. and Kashtan, B. (2019). The Advantages of Using Surface Wave Tomography in the Marine Studies of the Upper Part of the Seismic Section. In: *Marine Technologies*, April, 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901819>
- Presnov, D.A., Sobisevich, A.L., Gruzdev, P.D., Ignatiev, V.I., Konkov, A.I., Moreev, A.Yu., Tarasov, A.V., Shuvalov, A.A. and Shurup, A.S. (2019). Tomographic estimation of water parameters in the presence of ice cover using seismo-acoustic emitters. *Akusticheskii zhurnal*, 65 (5), 688–698. <https://doi.org/10.1134/S0320791919050186> (in Russian)
- Presnov, D.A., Sobisevich, A.L. and Shurup, A.S. (2016). Model of the geoacoustic tomography based on surface-type waves. *Physics of Wave Phenomena*, 24 (3), 249–254. <https://doi.org/10.3103/S1541308X16030109>
- Rector, J.W., Pfeiffe, J., Hodges, S., Kingman, J. and Sprott, E. (2015). Tomographic imaging of surface waves: A case study from the Phoenix Mine, Battle Mountain, Nevada. *The Leading Edge*, 34 (11), 1360–1364. <https://doi.org/10.1190/tle34111360.1>
- Roslov, Y.V., Merezko, A.A., Polovkov, V.V., Popov, D.A. and Zhemchuzhnikov, E.G. (2014). Multicomponent seismic survey in transition zone of Pechora Bay with node system Turtle-500. In: *6th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition*, April, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140213>
- Ryzhkov, V.I., Sergeev, K.S., Roslov, Y.V., Polovkov, V.V. and Elistratov, A.V. (2015). Engineering surveys by the method of the cableless ocean bottom seismic. In: *11th EAGE Int. Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophys.*, Sep. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412223>
- Shishkina, M.A., Fokin, I.V. and Tikhotskiy, S.A. (2015). Resolution of cross-well travel-time tomography. *Seismicheskiye tekhnologii*, 1, 5–21. (in Russian)

- Socco, L., Foti, S. and Boiero, D. (2010). Surface-wave analysis for building near-surface velocity models — established approaches and new perspectives. *Geophysics*, 75 (5), 75A83–75A102. <https://doi.org/10.1190/1.3479491>
- Yanovskaya, T.B. (2015). *Surface wave tomography in seismological studies*. St Petersburg: Nauka. (In Russian)
- Yanovskaya, T.B. and Ditmar, P.G. (1990). Smoothness criteria in surface wave tomography. *Geophys. Journal Int.*, 102 (1), 63–72. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb00530.x>

Received: March 4, 2021

Accepted: April 18, 2022

Contact information:

Ilya S. Levin — levinilia19@gmail.com

Andrey V. Ponomarenko — a.v.ponomarenko@spbu.ru

Vyacheslav V. Polovkov — v.v.polovkov@gmail.com

Dmitry A. Popov — mail@dpopov-spb.ru

Vladimir N. Troyan — vntroyan@mail.ru