

УДК 550.34; 519.688; 504.5.06  
DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art18

## **ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ В СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ**

Чеботарева И.Я.  
Институт проблем нефти и газа РАН  
E-mail: irinache@inbox.ru

**Аннотация.** В статье обсуждаются особенности алгоритмов решения двухточечной задачи трассировки лучей в методе эмиссионной сейсмической томографии. Эти особенности связаны с необходимостью расчета большого числа лучей распространения сигналов между точкой опроса и точкой приема. Выбор метода трассировки определяется также имеющимся типом скоростной модели – горизонтально слоистой, градиентной, слоистой моделью со сложной геометрией внутренних границ. Работоспособность алгоритмов для скоростных моделей разного типа проиллюстрирована с использованием численного моделирования. Важной особенностью алгоритма трассировки для скоростной модели со сложной геометрией внутренних границ является возможность построения луча с учетом резких границ изменения скорости в среде. Приведены примеры опробования разработанных автором алгоритмов трассировки лучей на экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** сейсмическая эмиссионная томография, нефтегазовые месторождения, 3D трассировка лучей, сложные скоростные модели.

## **FEATURES OF RAY TRACING ALGORITHMS IN SEISMIC EMISSION TOMOGRAPHY**

Chebotareva I.Ya.  
Oil and Gas Research Institute RAS  
E-mail: irinache@inbox.ru

**Abstract.** The article discusses the features of algorithms for solving the two-point problem of ray tracing in the method of emission seismic tomography. These features are associated with the need to calculate a large number of signal propagation rays between the scan point and the reception point. The choice of the tracing method is also determined by the available type of the velocity model – a horizontally layered, gradient, layered model with a complex geometry of the internal boundaries. The efficiency of algorithms for velocity models of various types is illustrated using numerical simulation. An important feature of the tracing

algorithm for the velocity model with a complex geometry of internal boundaries is the possibility of ray tracing with account of the boundaries of the sharp velocity change in the medium. The ray tracing algorithms developed by the author were tested on experimental data and the results are given in the article.

**Keywords:** seismic emission tomography, oil and gas fields, 3D ray tracing, complex velocity models.

Эмиссионная сейсмическая томография нацелена на изучение экстремально слабых сейсмических источников, сигналы от которых могут быть невидимы на фоне шума на записях единичных регистраторов [1–8]. В отличие от микросейсмического мониторинга эмиссионная томография позволяет не только локализовать очаги микроземлетрясений, но и проследивать процесс подготовки сейсмических событий и последующий процесс релаксации напряженно-деформированного состояния горных пород.

В методе эмиссионной томографии носителем полезной информации является сейсмическая эмиссия. Этот эффект был зарегистрирован в качестве открытия в 1983 году [9]. Он заключается в том, что в массиве горных пород существуют области слабого сейсмического излучения, которые активизируются при внешних природных и техногенных воздействиях. Сигналы сейсмической эмиссии являются экстремально слабой составляющей естественного сейсмического шума Земли (сейсмического фона) на дневной поверхности. Их амплитуда может быть очень мала и неразличима на единичных записях на фоне шума. Более того, экспериментальные наблюдения показали, что сигналы сейсмической эмиссии могут иметь различную форму [10]. Они могут быть представлены импульсами, короткими волновыми пакетами, длительным шумоподобным излучением. Традиционными сейсмическими методами (с определением времен вступлений сейсмических фаз) локализовать источники сейсмической эмиссии нельзя. Для изучения эффекта сейсмической эмиссии в 1980 г. был предложен [1] специальный метод, со временем получивший название эмиссионной сейсмической томографии.

Геофизиками, работающими в области эмиссионной томографии, к данному моменту предложено много различных алгоритмов локализации сейсмических источников. Выбор конкретного алгоритма определяется требованиями эксперимента и условиями регистрации. Существующие алгоритмы можно классифицировать различным образом. Например, можно разделить все подходы на два типа алгоритмов по способу

формулировки решения о наличии эмиссионных источников [11]: алгоритмы параметрического типа и непрерывного пространственного анализа.

Алгоритмы первого типа [12, 13] реализуют одновременный поиск наилучших значений для всех параметров путем минимизации выбранной целевой функции, а в качестве параметров могут быть выбраны число источников, их мощность излучения, координаты источников, параметры скоростной модели. Параметрические алгоритмы обеспечивают большую точность локализации источников, теоретически – с точностью до реальных границ объекта. Но процесс оптимизации целевой функции обычно длителен по времени и неустойчив (может сходиться к неправильному решению, либо сходимости может вообще отсутствовать). Поэтому число параметров стараются максимально уменьшить. Часто ограничиваются поиском на заданном временном интервале записей координат одного наиболее яркого источника и средней скоростью распространения сигнала в среде.

В алгоритмах же непрерывного пространственного анализа [1–8] для всех точек опроса среды рассчитывается некоторый функционал. Если экстремумы функционала превышают уровень статистического разброса фоновых значений, то положение этих экстремумов ассоциируется с положением эмиссионных источников. К этому типу относится, кстати, первый из предложенных алгоритмов эмиссионной томографии [1]. Алгоритмы непрерывного пространственного анализа не столь совершенны в точности локализации точечных источников, как параметрические алгоритмы, но всегда устойчивы и статистически значимы. Качество изображений эмиссионных источников внутри среды для этого типа алгоритмов в значительной степени зависит от качества настройки многоканальной сейсмической антенны. Другими словами, зависит от степени соответствия истинной и использованной скоростных моделей и корректности трассировки лучей между точкой опроса и точкой приема.

Параметрические методы эмиссионной томографии с использованием однородной скоростной модели среды и «средней скорости» вполне приемлемы, например, при локализации трещины гидроразрыва. Глубина исследований при этом составляет обычно 1.5–3 км, а размер целевого объекта – около сотни метров. Если анализируются источники только вблизи трещины, то скорость внутри такого объема изменяется незначительно. Если же необходимо исследовать на наличие эмиссионных источников большие объемы геосреды (1–2 км и более), использование однородной скоростной модели недопустимо.

Скорость внутри исследуемого объема значительно изменяется, и использование «средней скорости» существенно снижает чувствительность метода и ухудшает пространственное разрешение. Существующие эмиссионные источники можно просто «не увидеть». Представленные ниже на рис. 1 и рис. 2 результаты показывают, насколько важно наиболее полно и корректно использовать информацию о скоростной модели среды.

3D моделирование сейсмического полноволнового поля в гетерогенных средах представляет из себя сложную вычислительную задачу [14]. При реализации точного решения используются уравнения акустики для конкретной модели среды. Возможно использование подхода с осредненными параметрами модели [15–18], либо с явным учетом неоднородностей (поры, трещины и пр.) [19–20]. При решении уравнений акустики проводится их дискретизация, выбор граничных условий и итерационное компьютерное решение сеточных уравнений [21–23]. Сеточные методы позволяют проводить аккуратное моделирование с учетом дифракционных эффектов и динамических особенностей волновых полей. Однако они высокочувствительны по времени и вычислительным ресурсам. В отличие от них лучевые методы, при высокой точности по расчету времени пробега вдоль луча и углу выхода, позволяют существенно уменьшить объем необходимых вычислений. Хотя их применимость ограничивается только высокочастотным приближением, для целей эмиссионной томографии они предпочтительны.

При трассировке лучей в методе эмиссионной томографии приходится не просто рассчитывать ход луча в среде, а решать двухточечную задачу построения луча: из точки опроса в точку приема. При решении такой задачи часто используют один из общепринятых методов: метод пристрелки или метод изгиба луча [14]. При нерегулярных площадных расстановках приемных датчиков, которые обычно используются в эмиссионной томографии, метод изгиба луча является более удобным.

Большая популярность метода скоростной томографии привела к разработке многочисленных точных и приближенных методов трассировки лучей. Они могут быть, в принципе, использованы и для эмиссионной томографии. Однако, особый интерес вызывают приближенные лучевые методы [24–29], которые позволяют уменьшить время компьютерных расчетов на несколько порядков по сравнению с точными методами. Автором данной статьи также были разработаны и опробованы на экспериментальном

материале несколько алгоритмов трассировки лучей для различных типов скоростных моделей [30–33].

Далее на рис. 1 и рис. 2 приведены экспериментальные результаты с использованием трассировки лучей при горизонтально слоистой модели среды, которые показывают, насколько важно наиболее полно и корректно использовать информацию о скоростной модели среды.

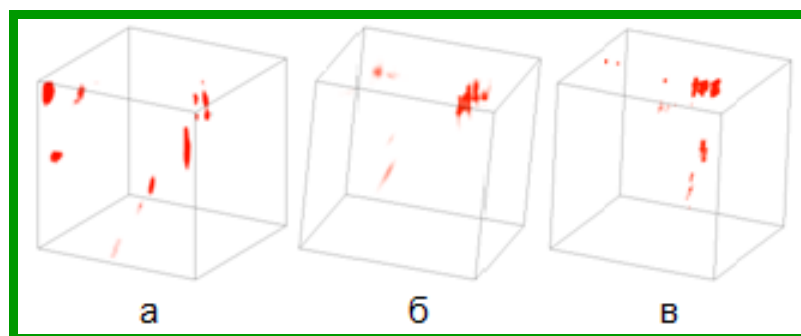


Рис. 1. Изображение сейсмических источников в исследуемом объеме среды при использовании разных скоростных моделей: а – одномерная модель, б – двухслойная модель, в – пятислойная модель

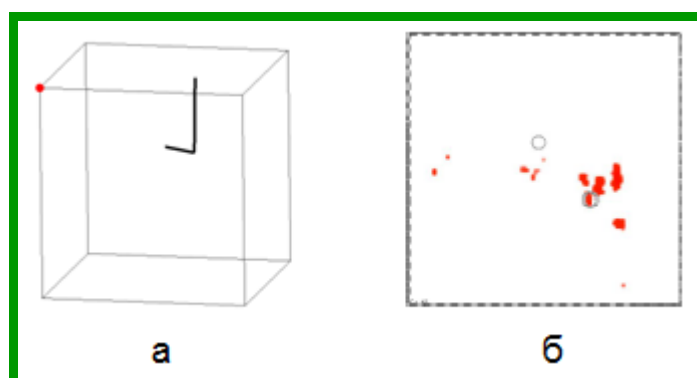


Рис. 2. Расположение скважины внутри исследуемого объема среды (а), красной заливкой показана проекция на горизонтальную плоскость сейсмических источников при использовании пятислойной модели (б), кружками на горизонтальной проекции помечено положение вертикального ствола скважины и конца горизонтального ствола

Исследования проводились для кубического объема пород со стороной 3 км. Для района исследований имелась сложная слоистая скоростная модель, полученная методом ВСП (вертикальное сейсмическое профилирование). Для сокращения времени расчета сейсмических лучей было решено провести упрощение модели. Целью тестирования был выбор модели, содержащей наименьшее число слоев, но позволяющей выделять наличие

источников во всем диапазоне глубин. Для тестирования был построен набор горизонтально слоистых скоростных моделей с разным числом слоев, с разной степенью обобщенности отражающий особенности исходной модели ВСП. При сглаживании исходной модели в соответствующих диапазонах глубин средняя скорость рассчитывалась путем усреднения медленностей (величин, обратных скоростям), то есть сохранялось время пробега сигнала для модели и исходного временного разреза.

Для тестирования был выбран интервал записей на времени технических работ, при интенсивной антропогенной активности у устья скважины. Для этого интервала при низкочастотной фильтрации на единичных записях хорошо просматриваются сейсмические фазы сигналов техногенной активности. Источники этих сигналов должны проявиться на поверхности при правильном выборе скоростной модели. Про расположение глубинных низкочастотных источников на этом временном интервале ничего определенного сказать нельзя, можно лишь надеяться на их существование.

На рис. 1 показаны изображения, полученные для однородной модели с постоянной скоростью, двухслойной модели и пятислойной модели. Из вида распределений сейсмических источников можно заключить, что однородная скоростная модель со «средней скоростью» является неудачной. Поверхностные источники антропогенной активности на ней практически не видны, они полностью расфокусированы. Наиболее ярко проявился источник на средних глубинах. Это не удивительно, так как средняя по глубинам скорость наиболее соответствует его расположению. Поверхностные источники четко проявляются при более детальных скоростных моделях, начиная с двухслойной. Оба источника (приповерхностный и среднеглубинный) уже устойчиво проявляются при четырех и пяти слоях модели, но они лучше локализованы для пятислойной модели.

Приповерхностный источник соответствует положению устья скважины и ассоциируется с областью техногенной активности вокруг скважины (рис. 2). Глубинный источник по глубине соответствует горизонтальному участку скважины, а в плане близок к точке перегиба скважины. Можно предположить, что среднеглубинный источник является результатом рассеяния гидроволны в месте сочленения вертикального и горизонтального участка скважины.

Приведенные экспериментальные результаты подтверждают большую степень влияния адекватности скоростной модели при использовании эмиссионной сейсмической томографии. Поэтому в работах автора всегда ставилась цель максимально использовать

всю имеющуюся информацию о скоростной модели в районе исследований. Были разработаны и экспериментально опробованы быстрые приближенные алгоритмы и программы 3D трассировки лучей для слоистой [2, 4–8, 30–33] и градиентной модели среды [4, 6, 30, 32]. Примеры использования разработанных алгоритмов трассировки лучей иллюстрируются приведенными ниже рисунками.

На рис. 3 показаны результаты исследований земной коры до глубин 100 км [5–6, 32]. Использован метод трассировки лучей для горизонтально слоистой среды и метод эмиссионной томографии, наиболее эффективный при сильном возмущении фронтов сигналов, что характерно для сильно неоднородных сред и при исследовании очень больших глубин. В переходной зоне кора-мантия (см. рис. 3, в) была выявлена кольцевая структура каналов проникновения в кору мантийного вещества.

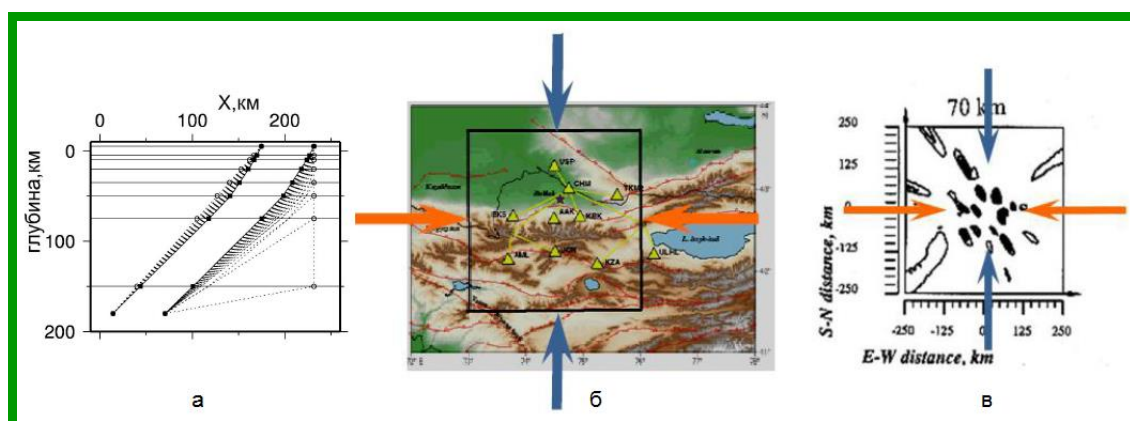


Рис. 3. Эмиссионная томография с горизонтально слоистой скоростной моделью среды: а – итерационная сходимость лучей для скоростной модели района исследований, б – схема района исследований, в – горизонтальный срез сейсмоэмиссионного изображения на глубине переходной зоны кора-мантия; цветные стрелки позволяют сделать привязку эмиссионного изображения к площадке исследований

На рис. 4. и рис. 5 показаны примеры использования метода 3D трассировки лучей для градиентной модели среды [30, 32]. Рис. 4 иллюстрирует итерационный процесс деформирования луча для градиентной скоростной модели  $V=1.4+0.36h+0.1x+0.05x^2+0.1y+0.03xy$ . Модель не симметрична, что проявляется в несимметричности лучей по X и Y координатам.

На рис. 5 приведен результат использования алгоритма трассировки лучей для градиентной модели среды и алгоритма эмиссионной томографии с адаптивной пространственной фильтрацией когерентной помехи. В результате фильтрации удалось полностью устранить экранирующее влияние сильной техногенной помехи и получить

изображение нефтяной ловушки, в которую попала скважина, давшая сильный приток нефти.

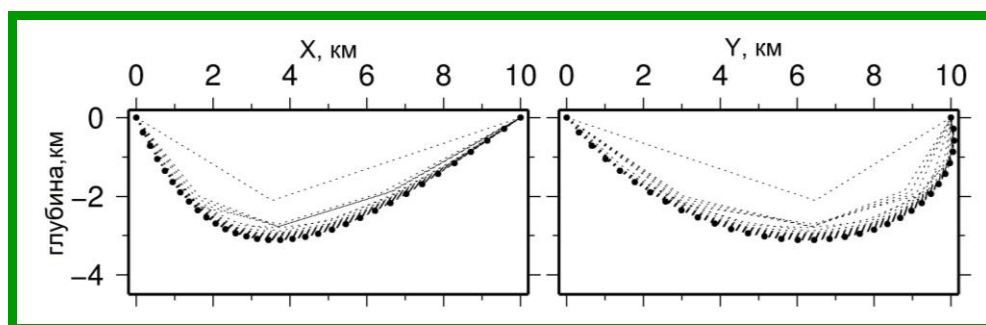


Рис. 4. Численное моделирование итерационного процесса деформирования луча для градиентной скоростной модели [32]

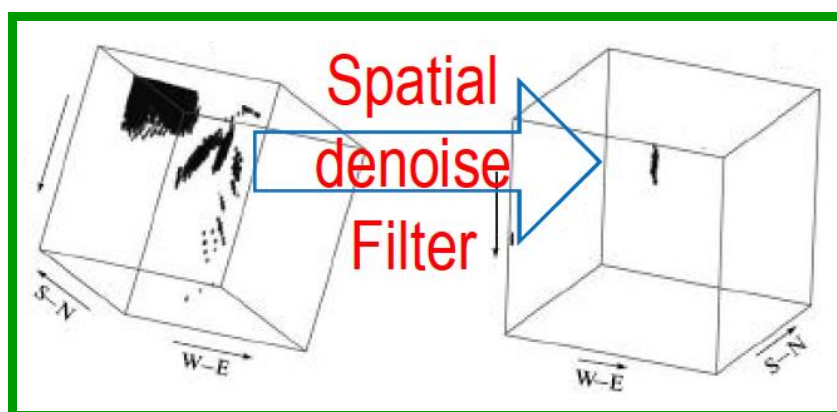


Рис. 5. Результат использования алгоритма трассировки лучей для градиентной модели среды: слева – сейсмозмиссионное изображение с экранирующим влиянием сильной техногенной помехи при использовании ординарного алгоритма локализации источников, справа – сейсмозмиссионное изображение нефтяной ловушки при использовании алгоритма эмиссионной томографии с адаптивной пространственной фильтрацией

В результате проведения сейсморазведочных работ получают скоростные модели со сложной геометрией границ. Для точной привязки эмиссионных источников для таких скоростных моделей был разработан метод решения двухточечной задачи построения луча в средах со сложной трехмерной геометрией [30–33]. Важной особенностью данного алгоритма является возможность построения луча с учетом резких границ изменения скорости в среде. Возможности этого алгоритма пока исследованы только с помощью численного моделирования. На рис. 6 и 7 показаны примеры трассировки лучей для сложной модели, подробно описанной в [32], где скорости в слое возрастают с увеличением глубины. На данных рисунках приведены примеры пересечения лучом границ в виде смещенных сферических оболочек и наклонных горизонтальных границ, а

также итерации расчета луча вблизи точек выклинивания с разным положением начального приближения относительно точки выклинивания. Результаты показывают высокую устойчивость работы алгоритма.

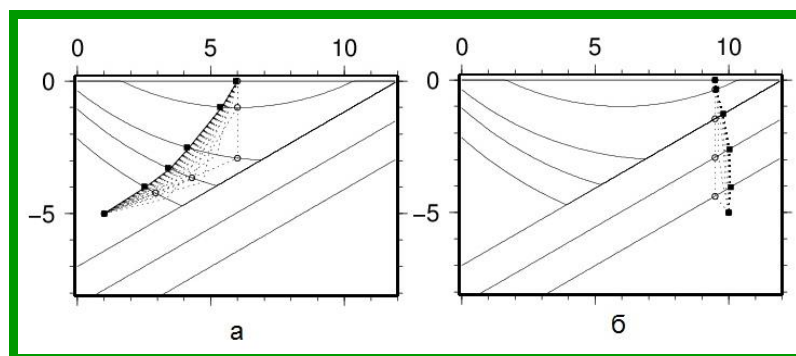


Рис. 6. Трассировка лучей для границ в виде смещенных сферических оболочек (а) и наклонных горизонтальных границ (в)

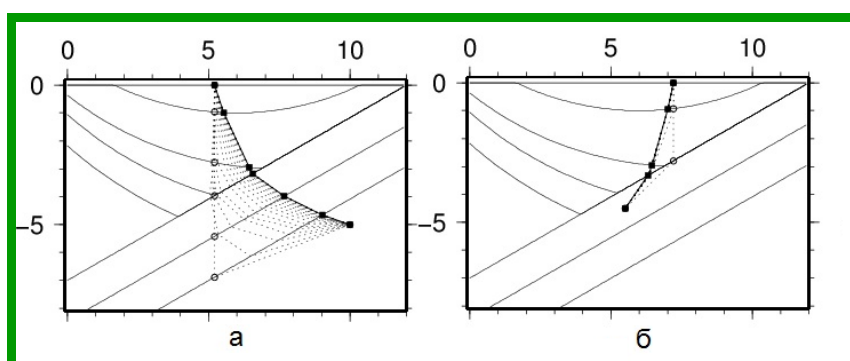


Рис. 7. Трассировка лучей вблизи точки выклинивания пластов, скорости в слое возрастают с увеличением глубины

*Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА-А16-116021510125-7).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я. Способ сейсмической разведки: А.с. 1000962 СССР. № 3213796, Заявл. 08.12.80; Оpubл. 28.02.83 // Открытия, изобретения. 1983. № 8. 4 с.
2. Tchegotareva I.I., Nikolaev A.V., Sato H. Seismic emission activity of Earth's crust in Northern Kanto, Japan // PEPI. 2000. Vol. 120, No. 3. P. 167–182.

3. Чеботарева И.Я. Новые алгоритмы эмиссионной томографии для пассивного сейсмического мониторинга разрабатываемых месторождений углеводородов. Ч. I. Алгоритмы обработки и численное моделирование // Физика Земли. 2010. № 3. С. 7–19.
4. Чеботарева И.Я. Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 844–853.
5. Чеботарева И.Я. Алгоритм сейсмической эмиссионной томографии при ослаблении пространственной корреляции сигнала // Вестник МГОУ. Естественные науки. 2011. № 1. С. 101–107.
6. Чеботарева И.Я. Эмиссионная томография – базовый инструмент для технологий изучения месторождений углеводородов // Актуальные проблемы нефти и газа. 2017. Вып. 2(17). 24 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 01.11.2018).
7. Чеботарева И.Я. Эмиссионная сейсмическая томография – инструмент для изучения трещиноватости и флюидодинамики земной коры. // Георесурсы. 2018. Т. 20, № 3. Ч. 2. С. 238–245.
8. Chebotareva I., Dmitrievsky A., Eremin N. Nanoseismological monitoring of hydraulic fracturing // Paper SPE-191688-18RPTC-MS prepared for presentation at the SPE Russian Petroleum Technology Conference. Moscow, Russia, 15–17 October 2018. 9 p.
9. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли: Диплом на открытие № 282 Госкомизобретений СССР. М., 1983. 1 с.
10. Хаврошкин О.Б. Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии. М.: ОИФЗ РАН. 1999. 286 с.
11. Мюнье Ж, Делиль Ж.Ю. Пространственный анализ в пассивных докационных системах с помощью адаптивных методов // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 11. С. 21–37.
12. Александров С.И., Мишин В.А., Буров Д.И. Проблемы скважинного и наземного микросейсмического мониторинга гидроразрыва пласта // Экспозиция Нефть и Газ. 2015. № 6(45). С. 58–63.
13. Шмаков Ф. Д. Программный комплекс решения обратных кинематических задач микросейсмического мониторинга // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2010. Т. 8, № 2. С. 34–42.

14. Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике / Под ред. Г. Нолета. М.: Наука, 1990. 416 с.
15. *Biot M.A.* Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media // *Journal of Applied Physics*. 1962. Vol. 33, No. 4. P. 1482–1498.
16. *Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А.* Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра. 1970. 336 с.
17. *Baird G.E., Thomas P.D., Sang G.* The propagation of elastic waves through a layered poroelastic medium // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1996. Vol. 99. No. 6. P. 3385–3392.
18. *Berryman J.G.* Elastic wave propagation in fluid saturated porous media // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1984. Vol. 69, No. 2. P. 416–424.
19. *Левянт В.Б., Петров И.Б., Панкратов С.А.* Исследование характеристик продольных и обменных волн обратного отклика от зон трещиноватого коллектора // *Технологии сейсморазведки*. 2009. № 2. С. 3–11.
20. *Квасов И.Е., Петров И.Б., Панкратов С.А.* Численное моделирование сейсмических откликов в многослойных геологических средах сеточно-характеристическим методом // *Математическое моделирование*. 2010. Т. 22, № 9. С. 13–21.
21. *Saenger E.H., Gold N., Shapiro S.A.* Modeling the propagation of the elastic waves using a modified finite-difference grid // *Wave Motion*. 2000. Vol. 31, No. 1. P. 77–92.
22. *Podvin P., Lecomte I.* Finite difference computation of travel times in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools // *Geophysical Journal International*. 1991. Vol. 105. P. 271–284.
23. *Bermudez A., Hervella-Nieto L., Rodriguez R.* Finite element computation of three-dimensional elastoacoustic vibrations // *Journal of Sound and Vibration*. 1999. Vol. 219, No. 2. P. 279–306.
24. *Jacob K.H.* Three-dimensional seismic ray tracing in a laterally heterogeneous spherical Earth // *Journal of Geophysical Research*. 1970. Vol. 75. P. 6675–6689.
25. *Koulakov I.* LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. Vol. 99(1), No. 1. P. 194–214.

26. *Um J., Thurber C.* A fast algorithm for two-point seismic ray tracing // Bulletin of the Seismological Society of America. 1987. Vol. 77, No. 3. P. 972–986.
27. *Thurber C.H., Ellsworth W.L.* Rapid solution of ray tracing problems in heterogeneous media // Bulletin of the Seismological Society of America. 1980. Vol. 170. No. 4. P. 1137–1148.
28. *Ступина Т., Кулаков И.* Сложностно-структурный подход к исследованию области применимости алгоритма PROFIT // International Book Series «Information Science and Computing». 2009. P. 79–85.
29. *Zhao D., Hasegawa A., Horiuchi S.* Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan // Journal of Geophysical Research. 1992. Vol. 97. P. 19909–19928.
30. *Чеботарева И.Я.* Трассировка лучей в методе сейсмической эмиссионной томографии // Радиопромышленность. 2017. № 1. С. 19–25.
31. *Чеботарева И.Я.* Определение положения точки преломления на интерфейсах сложной геометрии при трехмерной трассировке лучей // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 141–144.
32. *Чеботарева И.Я.* Методы трассировки лучей в эмиссионной сейсмической томографии // Физика земли. 2018. № 2. С. 12–24.
33. *Чеботарева И.Я.* Особенности трехмерной трассировки лучей в средах со сложной геометрией границ раздела при выклинивании слоев // Радиопромышленность. 2018. № 2. С. 63–70.