

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ АЛГОРИТМОВ

► Разработка и тестирование библиотеки алгоритмов сейсмической томографии

А. А. Никитин¹, Л. Ю. Епонешникова², А. А. Дучков³

¹ *NikitinAA@ipgg.sbras.ru*

^{1,2,3} *Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН*

Аннотация. Метод сейсмической томографии заключается в построении скоростной модели геологического разреза на основе данных времён пробега сейсмических волн. В докладе представлены результаты работы по разработке параллельных алгоритмов сейсмической томографии и их реализации в виде программной библиотеки и сопутствующей ей программы *ST3D*. Программа позволяет быстро и эффективно обрабатывать большие объёмы данных сейсмических наблюдений, полученных как в ходе активных сейсморазведочных работ, так и в ходе пассивных сейсмологических наблюдений. Имеется возможность восстанавливать *P*- и *S*-скоростные модели как вместе, так и по отдельности. Реализация алгоритмов в виде библиотеки допускает их встраивание в программные пакеты интерпретационной обработки в виде плагинов. Для проверки корректности работы программы *ST3D* и возможностей её применения для обработки сейсмологических данных был проведён ряд тестов с использованием реальных данных пассивного сейсмологического мониторинга, полученных на территории оз. Байкал. Тестирование показало высокую производительность разработанных алгоритмов и программ.

Метод сейсмической томографии [1] заключается в построении скоростной модели геологического разреза на основе данных времён пробега сейсмических волн. Метод получил широкое распространение при обработке региональных и глобальных сейсмологических данных, в инженерной сейсморазведке при проведении контроля за состоянием различных конструкций и прилегающей вмещающей среды. В сейсморазведке метод активно применяется для построения скоростной модели верхней части разреза по данным времён первых вступлений и её уточнения по всему разрезу по временам отражённых волн. В связи с развитием систем наблюдений и ростом объёмов сейсмических данных актуальной проблемой является разработка новых, более эффективных вычислительных алгоритмов и их программных реализаций, которые бы позволили повысить производительность восстановления трёхмерных скоростных моделей методом сейсмической томографии.

В докладе будут представлены результаты работы по разработке параллельных алгоритмов сейсмической томографии и их реализации в виде программной библиотеки и сопутствующей ей программы *ST3D*. Программа позволяет быстро и эффективно обрабатывать большие объёмы данных сейсмических наблюдений, полученных как в ходе активных сейсморазведочных работ, так и в ходе пассивных сейсмологических наблюдений. Имеется возможность восстанавливать *P*- и *S*-скоростные модели как вместе, так и по отдельности. Реализация алгоритмов в виде библиотеки допускает их встраивание в программные пакеты интерпретационной обработки в виде плагинов.

Описание алгоритма. В программе реализован алгоритм лучевой сейсмической томографии. На входе пользователь задаёт наблюдённые времена первых вступлений сейсмических волн для пар «источник-приёмник», трёхмерную начальную скоростную модель, близкую к реальной, а также параметры алгоритма, такие как количество итераций томографического алгоритма, коэффициенты регуляризации и т. д. В начале каждой итерации решается уравнение эйконала для вычисления времён первых вступлений сейсмических волн в текущей скоростной модели. Для решения уравнения эйконала используется алгоритм *Block Locking Sweeping Method (BLSM)* [2], обладающий высокой эффективностью параллельной реализации на современных многоядерных процессорах.

Затем для пассивных источников (в случае их наличия) выполняется процедура релокации – уточнения их координат в текущей скоростной модели. На следующем этапе строятся траектории лучей между источниками и приёмниками в текущей скоростной модели с помощью процедуры обратного лучевого трассирования и вычисляется томографическая матрица, связывающая изменения модели с невязками между наблюдаемыми и расчётными временами пробега волн. Для регуляризации томографической задачи матрица дополняется блоками сглаживания и амплитудного демпинга аномалий. На последнем этапе итерации для уточнения скоростной модели производится решение системы линейных алгебраических уравнений с помощью метода наименьших квадратов (*LSQR*).

Все вычислительные этапы алгоритма были распараллелены и оптимизированы под эффективную работу на современных многоядерных ЦПУ. К примеру, для тестирования производительности программы использовалась синтетическая задача с размером скоростной модели $101 \times 101 \times 101$ узлов сетки, 1 084 приёмников, 1 084 активных источников, 1 175 056 лучей (*P*- и *S*-фазы присутствуют для всех лучей), 3 итерации томографии. При решении данной задачи на 16-ядерном процессоре *AMD Ryzen 9 5950x* с двухканальной памятью *DDR4* время работы программы на 16 потоках составило всего 379 с.

Тестирование на реальных данных. Для проверки корректности работы программы *ST3D* и возможностей её применения для обработки сейсмологических данных был проведён ряд тестов с использованием реальных данных пассивного сейсмологического мониторинга, полученных на территории оз. Байкал.

В работе использовались данные времён пробега прямых волн, зарегистрированных с помощью станций Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС РАН (данные предоставлены Ц. А. Тубановым, ГИН СО РАН). В качестве исходных данных использовались записи 826 сейсмических событий, зарегистрированных с помощью 20 пунктов наблюдения (рис. 1). Исходное количество лучей продольных (P) волн составило 6 406 шт., поперечных (S) волн – 6 461 шт.

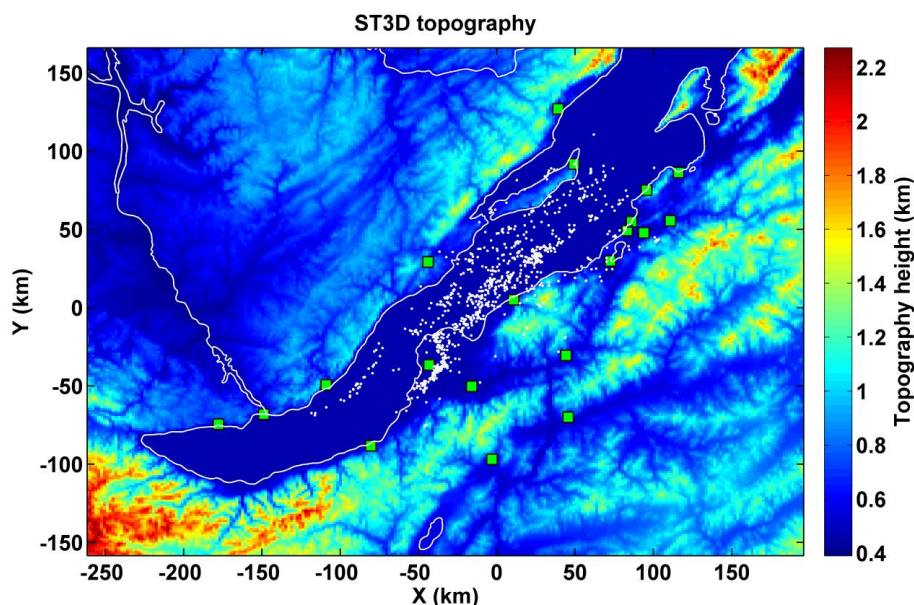


Рис. 1. Распределение сейсмичности (точки) и пунктов наблюдения (квадраты), цветом обозначена высота над уровнем моря (км)

Программа *ST3D* позволяет значительно ускорить вычисления за счёт использования многопоточности, что весьма удобно применительно к реальным данным. Это позволяет проводить большее количество различных тестов по подбору оптимальных параметров для алгоритма томографии за меньшее время. Для сравнения, все вычисления для данного набора данных в программе *ST3D* на 16 ядрах занимают около 8 с, в то время как в другой программе сейсмотомографической инверсии *LOTOS* [3], где не используются параллельные вычисления, этот процесс занял более 200 с.

На выходе программа *ST3D* позволяет получать трёхмерные распределения аномалий скоростей P - и S -волн с учётом данных о топографии района, распределения соотношения V_p/V_s , распределения лучей в исследуемой области, а также проводить синтетические тесты. Программа пре-

доставляет возможность проведения быстрого экспертного анализа посредством вывода на экран горизонтальных и вертикальных срезов с кубов данных. Параметры для вывода могут быть заданы пользователем по своему усмотрению.

Вывод на экран срезов с распределением лучей позволяет пользователю быстро определить область с хорошим покрытием лучами – такая область имеет принципиальную возможность восстановления скоростной модели. На рис. 2 видно, что исследуемая область в интервале глубин 5–15 км достаточно хорошо покрыта лучами в пределах системы наблюдений. В глубину лучи достигают 60 км.

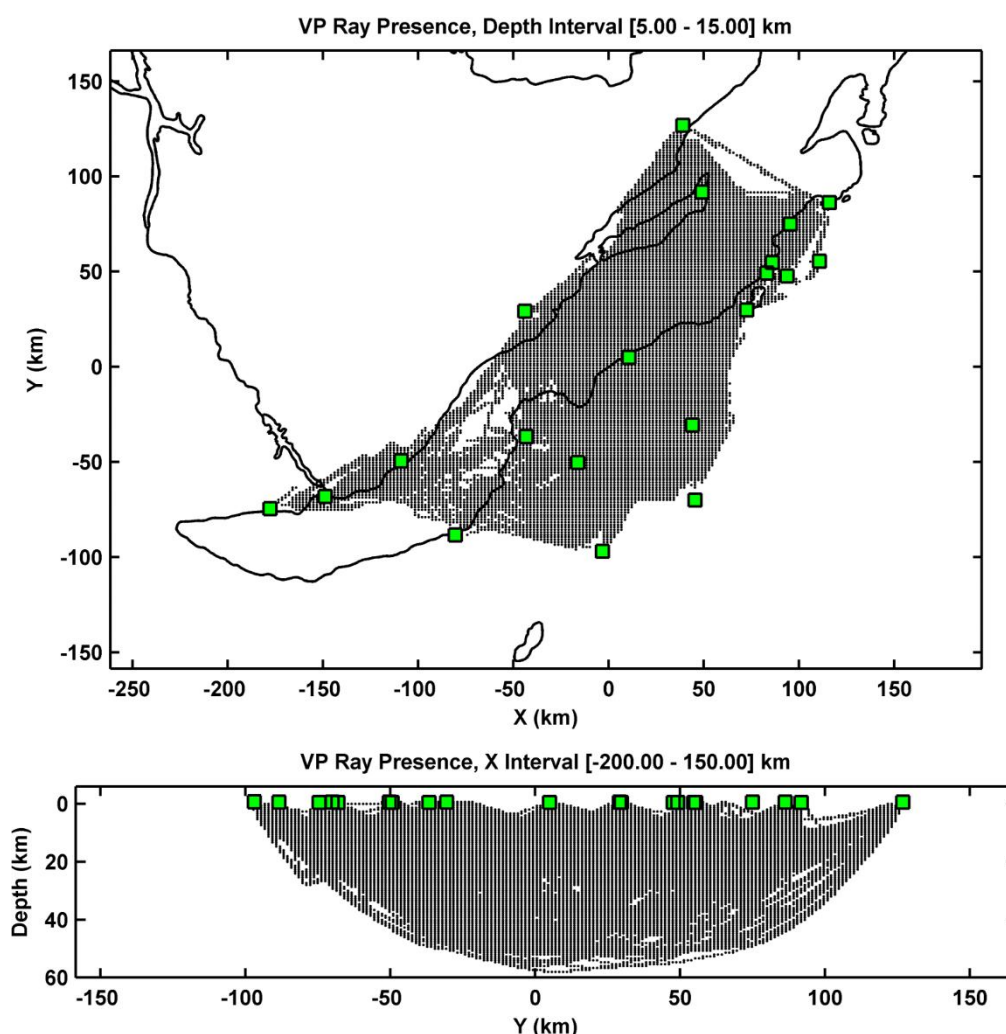


Рис. 2. Пример распределения лучей продольных волн в горизонтальной (показан интервал 5–15 км) (сверху) и вертикальной плоскостях (снизу)

Для проверки разрешающей способности и подбора оптимальных параметров регуляризации (сглаживание по горизонтали и вертикали, амплитудный демпинг) в программе *ST3D* предусмотрено проведение синтетических тестов. На рис. 3 приведён пример результатов восстановления синтетических моделей с заданными размерами и формой аномалий.

В данном случае показано, что в центральной части области надёжно восстанавливаются аномалии амплитудой $\pm 10\%$ и размерами 30×30 км. Необходимо заметить, что на данном этапе разработки программы пока не учитывается возможность задания случайного шума в синтетических тестах. Возможность его задания планируется добавить в ближайшем будущем.

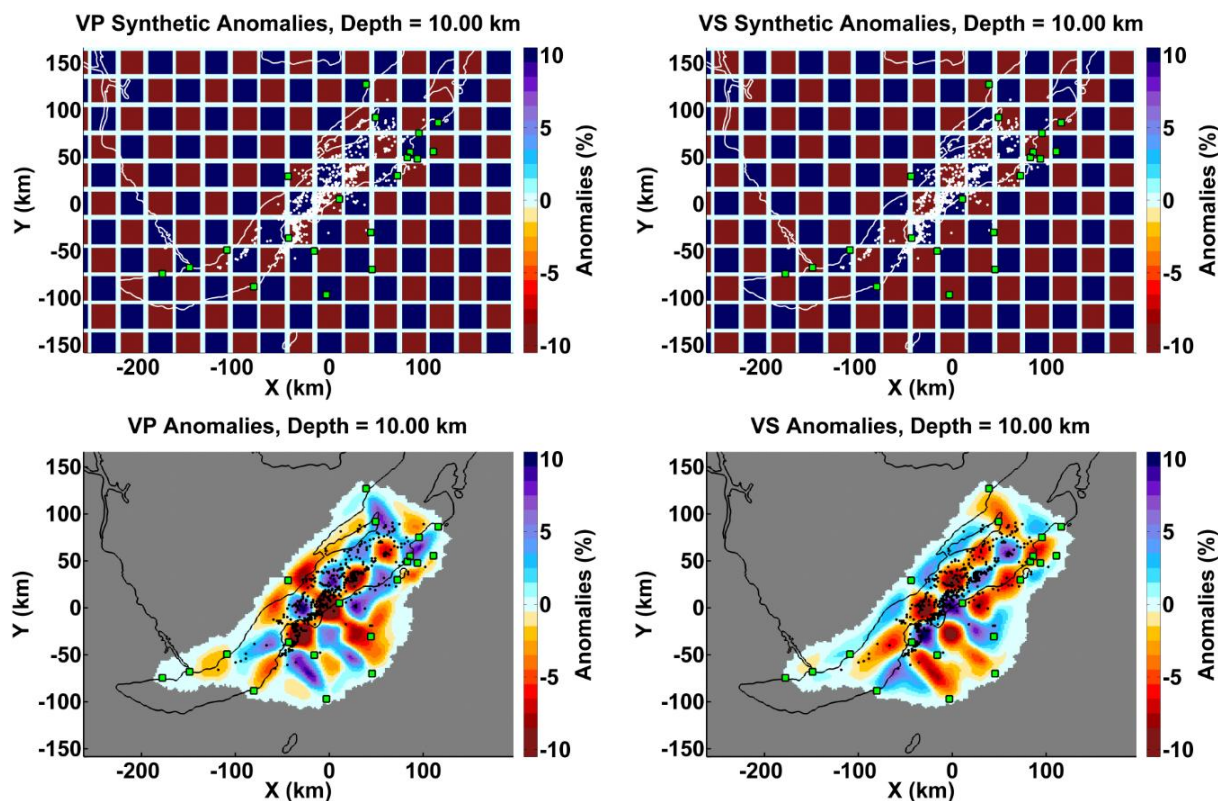


Рис. 3. Синтетические аномалии (сверху) и результат их восстановления (снизу) на глубине 10 км (точки – сейсмические события; квадраты – сейсмические станции)

В результате проведения томографической инверсии на реальных данных было получено трёхмерное распределение аномалий скоростей P - и S -волн. Примеры распределения аномалий показаны на горизонтальных (глубина среза – 10 км) и вертикальных сечениях (рис. 4). Значения среднеквадратичных невязок при этом составили 0,17 с для P -волн и 0,23 с для S -волн. Полученный результат имеет чёткое геологическое обоснование. Яркая отрицательная аномалия (красного цвета), которая прослеживается на горизонтальных сечениях посередине области, а на вертикальных – на глубинах от 0 до 15 км, соответствует наличию мощного осадочного чехла до 10–15 км в районе дельты р. Селенги [4].

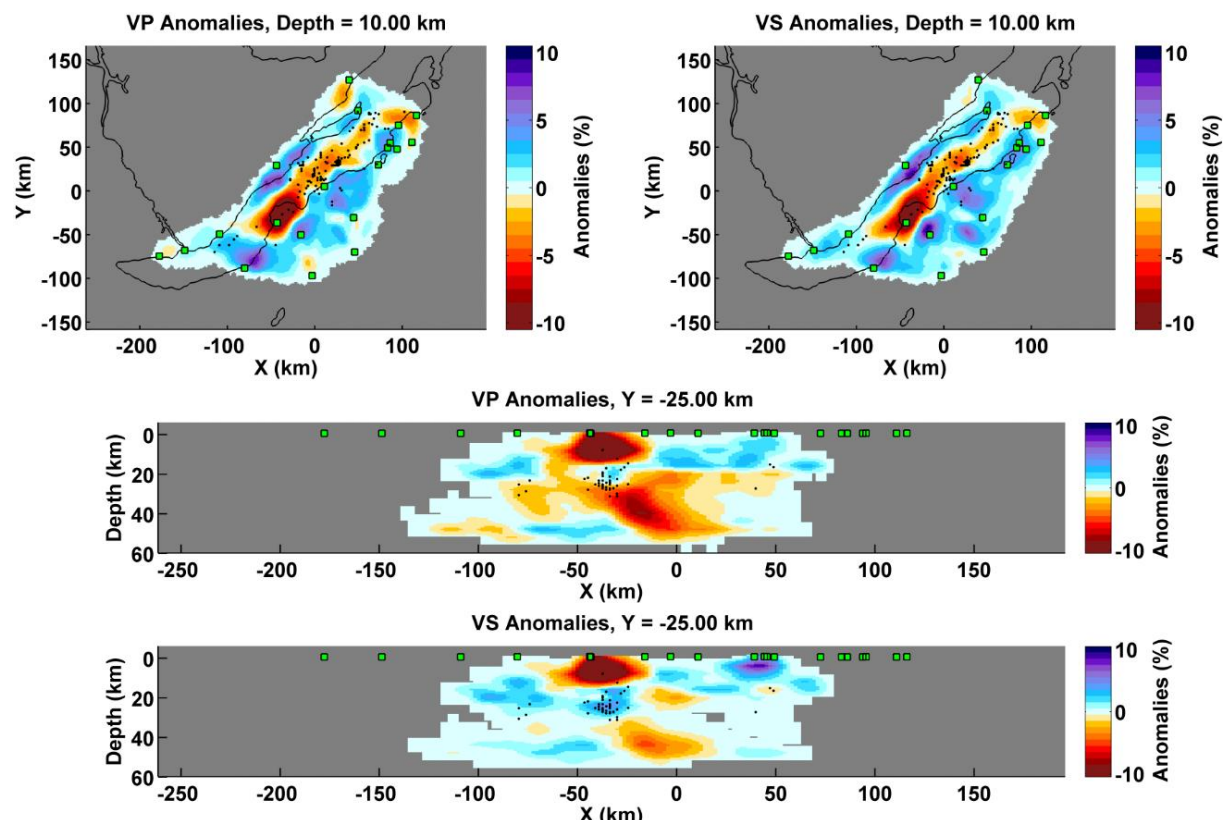


Рис. 4. Структура аномалий скоростей P- и S-волн по результатам томографической инверсии: горизонтальные (глубина среза – 10 км) и вертикальные сечения (точки – события вблизи сечения (полоса в 5 км); квадраты – сейсмические станции)

Выводы. На данный момент лучевая сейсмическая томография является эффективным инструментом для изучения строения земных недр. Учитывая большие объёмы данных в современных сейсмических задачах, а также то, что для подбора оптимальных параметров томографической инверсии и достижения наилучшего результата необходимо проведение большого количества тестов, возникает необходимость в разработке эффективных параллельных алгоритмов и программ, которые могут в разы повысить скорость вычислений.

Программа *ST3D* позволяет получить трёхмерную скоростную структуру геологического разреза с помощью проведения томографической инверсии времён пробега сейсмических волн. Скорость вычислений позволяет проводить большее количество запусков за меньшее время, чем в аналогичных программах по сейсмической томографии. Полученные результаты обработки данных в дальнейшем могут быть применены при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых, для изучения тектонических процессов и глубинной структуры земной коры в районе различных природных объектов, а также для контроля за инженерными конструкциями.

Список источников

1. Nolet G. Seismic Tomography: with Applications in Global Seismology and Exploration Geophysics / G. Nolet. Springer Science & Business Media, 1987. V. 5.
2. Nikitin A. A. Cache-efficient Parallel Eikonal Solver for Multicore CPUs / A. A. Nikitin, A. S. Serdyukov, A. A. Duchkov // Computational Geosciences. 2018. V. 22. № 3. P. 775–787.
3. Koulakov I. LOTOS Code for Local Earthquake Tomographic Inversion: Benchmarks for Testing Tomographic Algorithms / I. Koulakov // Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. V. 99. № 1. P. 194–214.
4. Logachev N. A. History and Geodynamics of the Baikal Rift / N. A. Logachev // Geology and Geophysics. 2003. № 5. P. 391–406.