

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ

Н. В. КОРОНОВСКИЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

SEISMIC TOMOGRAPHY

N. V. KORONOVSKY

The seismotomographical method of the study of the inner Earth is considered along with some other methods of geophysical tomography. The successes of seismotomographical method for decoding the Earth's mantle structure are demonstrated.

Рассмотрены сейсмотомографический метод изучения внутреннего строения Земли, а также другие методы геофизической томографии. Демонстрируются успехи сейсмотомографического метода для расшифровки структуры мантии Земли.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Геологи всегда мечтали увидеть, что же находится в недрах Земли. Ведь самая глубокая скважина в мире на Кольском полуострове проникла в толщу горных пород всего лишь на 12 км 262 м. Тем не менее о внутреннем строении земного шара мы знаем очень много, и эти знания основаны главным образом на изучении скоростей прохождения упругих волн в недрах Земли. Значения скоростей различных сейсмических волн позволяют рассчитать распределение плотности вещества и давления внутри Земли. Все это дало возможность геофизикам предложить несколько моделей внутреннего строения Земли с выделением в ее пределах ряда сферических оболочек, характеризующихся более или менее однородными физическими свойствами и достаточно четкими поверхностями или границами разделов, обозначенными благодаря изменению скоростей упругих объемных сейсмических волн. Наибольшим признанием ученых до последнего времени пользовалась модель строения Земли К.Е. Буллена, созданная в 1959–1969 годах. В последнее время используется более новая, уточненная модель PREM (Preliminary Reference Earth Model), которая характеризуется “нормальным”, то есть усредненным распределением с глубиной различных физических параметров, в том числе скоростей сейсмических волн. Наиболее важным источником информации о строении Земли являются землетрясения, самые глубокие очаги которых располагаются на уровне примерно 700 км. Все землетрясения порождают сейсмические волны деформации, пронизывающие в различных направлениях земной шар.

Очевидно, что, чем больше регистрируется землетрясений, тем точнее и полнее информация о недрах нашей планеты. В последние десятилетия количество сейсмических станций во всем мире многократно увеличилось, а следовательно, возрос поток информации, обработка которой требует огромных по объему и трудоемких вычислений. И тут вовремя появились быстросрабатывающие компьютеры, позволившие на многие порядки ускорить процесс вычислений новых данных, непрерывно поступающих с сейсмостанций.

Именно эти два фактора – новые сейсмические станции и компьютеры позволили выявить небольшие (до $\pm 5\%$) отклонения скоростей прохождения сейсмических волн через недра Земли относительно стандартных моделей их распределения К.Е. Буллена или PREM. Гелогам открылась удивительная картина размещения аномальных участков в мантии Земли с положительными или отрицательными значениями скоростей упругих объемных сейсмических волн относительно их “нормальных” значений для соответствующих глубин. Эти участки можно наблюдать как в двух-, так и в трехмерном изображении. Методы, позволяющие получать подобные объемные картины неоднородностей в мантии и коре Земли, получили название сейсмической томографии.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ

Наверное, многие из читателей слышали о медицинской томографии, которая формирует двухмерное изображение определенного среза (слово “томо” означает срез) объекта, например головного мозга с помощью рентгеновских лучей. Проводя сканирование большого числа тонких срезов, можно построить и трехмерное (объемное) изображение интересующего врачей объекта. При таком исследовании источник рентгеновских лучей должен двигаться вокруг объекта и лучи, интенсивнее поглощаясь в более плотных тканях, дают на снимке более темное изображение. Различие в плотностях позволяет получить изображение интересующих нас неоднородностей, скажем новообразований в головном мозге.

Сейсмическая томография базируется на измерении скоростей объемных и поверхностных сейсмических волн, направленных таким образом, чтобы “просветить” интересующее геофизиков непрозрачное тело, например массив горных пород, который исследователь не может непосредственно наблюдать. При этом массив неподвижен, так же как источники и приемники сейсмических волн.

Приложение силы к твердому упругому телу – горной породе, например, в виде удара, мгновенного смещения по разлому, подземного взрыва – вызывает в нем деформацию, то есть сейсмическую волну, которая распространяется во все стороны от места приложения силы. Наиболее эффективным способом образования сильных колебаний является землетрясение, волны деформаций от очага или гипоцентра которого пронизывают весь земной шар. Специальные приборы – сейсмографы улавливают и фиксируют эти волны, преобразованные в колебания почвы, и записывают их в виде сейсмограмм.

Через твердое изотропное тело могут проходить только два типа объемных волн: продольные и поперечные. Первая из них представляет собой волну сжатия–растяжения, как и обычная звуковая волна. Смещение частиц вещества при этом происходит вдоль направления движения волны. В поперечной волне частицы перемещаются перпендикулярно направлению движения волны. Более подробно о сейсмических волнах можно прочитать в [1].

Скорости продольных (v_p) и поперечных (v_s) сейсмических волн составляют в горных породах обычно несколько километров в секунду и увеличиваются при повышении давления и плотности горной породы и понижении температуры. Скорость продольных волн всегда больше поперечных, и поэтому они первыми достигают регистрирующих приборов – сейсмографов. Интервал времени между приходом продольной и поперечной волн будет являться мерой расстояния до очага землетрясений. Поэтому, имея минимум три станции, можно довольно точно определить эпицентр землетрясения.

Сейсмические волны распространяются в гетерогенных средах не прямолинейно, а преломляются сложным путем, и скорость волн на различных глубинах определяется по годографам – графикам зависимости времени от координат точек наблюдения. Линейные годографы – это основной источник сведений о типах волн в сейсмологии.

Если сейсмические волны генерируются многими источниками, например очагами землетрясений, они достигают регистрирующих станций в расчетное время, которое устанавливается по принятой модели, допустим PREM. Но когда на их пути встречается какая-то аномальная масса, то скорость волн будет или уменьшаться, или, наоборот, увеличиваться в зависимости от значения плотности. Чем выше плотность, тем выше скорость сейсмических волн. Таким образом, объемные продольные и поперечные волны, проникая глубоко в мантию Земли, позволяют выявить неоднородности в ее пределах (рис. 1).

Вполне очевидно, что, чем больше сейсмических волн проходит через какую-либо неоднородность в мантии Земли или земной коре, тем более подробную информацию об изменениях фаз, периодов, амплитуд и скоростей этих волн мы будем иметь. Количество записей особенно важно, так как одно землетрясение дает лишь одну, усредненную скорость волны вдоль луча, попавшего на сейсмоприемник. Но когда лучей много и они идут с разных сторон, взаимно пересекаясь, тогда информация об источнике волн гораздо более полная. Иными словами, на сейсмоприемники поступят данные о флуктуациях многих физических параметров, которые после трудоемкого процесса их обработки покажут,

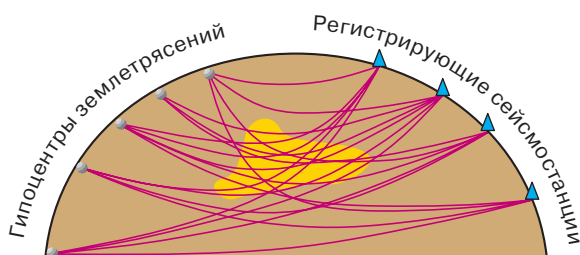


Рис. 1. Прохождение сейсмических волн через аномальное тело в мантии Земли. Синие треугольники – регистрирующие сейсмостанции. Черные кружки – гипоцентры землетрясений. Желтое – аномальное тело. Сейсмические волны, проходя через мантию и аномальное тело, изменяют в последнем свою скорость, что улавливается сейсмоприемниками. Чем больше сейсмостанций, тем точнее результат

какие существуют отклонения от стандартной модели. Поскольку землетрясений ежегодно происходит сотни тысяч, а станций, регистрирующих сейсмические волны, многие тысячи, необходимо обработать колоссальный объем материала, который может сделать только быстродействующая ЭВМ. Современные цифровые сейсмографы регистрируют сейсмические волны и позволяют сразу же вводить их в ЭВМ. Следует отметить, что исследования сейсмических границ и неоднородностей внутри Земли представляют собой сложную, непрерывно совершенствуемую задачу. Необходимо отфильтровать помехи и шумы, неизбежно возникающие при определении времени вступления продольных, поперечных и других волн на сейсмограмме.

Существуют различные методы для определения глубинных сейсмических границ и неоднородностей, связанные с отраженными, преломленными и обменными волнами. Но можно использовать, как это и делается в сейстотомографии, сразу все типы волн, не изучая их последовательно, а как бы суммируя их вместе. Это так называемая многоволновая томография, которая дает гораздо более качественное представление о глубинных неоднородностях. Надо подчеркнуть, что известные алгоритмы для построения изображений на основе анализа скоростей сейсмических волн удачно дополняются знанием особенностей геологических разрезов, которые хорошо известны для верхних горизонтов земной коры и прежде всего осадочных толщ, но хуже для ее более глубинных уровней и еще хуже для мантии Земли.

Процесс отбора необходимых сейсмических параметров и оценка их качества для получения томографического изображения столь же важны, как и конечный результат – построение трехмерной картины интересующей нас неоднородности в недрах Земли. Именно отбор экспериментальных сейсмических данных, а также

их первичная обработка являются тем необходимым основанием, на котором строится вся дальнейшая работа для получения изображения [4]. Это особо следует подчеркнуть для того, чтобы было понятно, почему сейстотомографические изображения, в основу которых положен, казалось бы, одинаковый первичный материал, при обработке разными исследователями могут значительно отличаться.

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАНТИИ ЗЕМЛИ

Сейсмическая томография позволила получить первые представления о конвективных течениях вещества в мантии Земли. До этого геологи и геофизики имели лишь умозрительные представления о подобных движениях в мантии, основываясь на явно несовершенных числовых моделях конвекции и изменениях поля силы тяжести на поверхности Земли. Та картина, которая открылась геофизикам при использовании сейстотомографии для изучения неоднородностей в мантии Земли, оказалась во многом неожиданной, что было продемонстрировано Д.Л. Андерсоном и А.М. Дзевонским еще в начале 80-х годов [3]. Самое важное, что удалось выявить, – это разнонаправленное горизонтальное или близкое к нему движение относительно холодного и нагретого вещества, а не только перемещение в вертикальной плоскости, как это предполагалось раньше. Холодные и горячие струи вещества мантии образуют сложное переплетение в горизонтальной и вертикальной плоскостях, и при этом не наблюдается полного соответствия их глубинных продолжений по отношению к поверхностным.

Так, например, нагретые колонны мантийного вещества под областями новейшего вулканизма или рифтовыми зонами срединно-океанических хребтов не поднимаются из глубины в виде прямых колонн, а имеют весьма причудливую форму, отклоняясь в стороны и обладая отростками, апофизами, шарообразными вздутиями.

Однако в пределах верхней мантии подтвердились основные положения теории тектоники литосферных плит, и мы действительно наблюдаем погружение холодных и более плотных океанических пластин под более легкие континентальные и подъем нагретого вещества вдоль осей рифтовых океанических и континентальных зон. Но эти закономерности непростые. Погружающиеся холодные плиты имеют различные углы падения от почти вертикальных до очень пологих. Часть из них достигает глубины верхней и нижней мантии (~670 км). Часть проникает ниже, а некоторые как бы продавливают поверхность верхней и нижней мантии, раздуваясь и образуя “бульбу”.

Наблюдаемая объемная картина мантийных неоднородностей, наличие сложно переплетающихся холодных и горячих или “быстрых” и “медленных” масс различной конфигурации создают причудливую и неожиданную модель внутренней структуры вещества мантии (рис. 2). Необычность картины объясняется еще и тем, что погружающиеся “холодные” плиты охлаждают прилегающие участки мантии, а поднимающиеся “горячие” струи, наоборот, нагревают их, из-за чего конфигурация мантийных неоднородностей становится еще более сложной. При этом нет однозначного ответа на вопрос, где и на каком уровне зарождаются струи нагретой, то есть “медленной”, мантии, так как наиболее неопределенные результаты томографии относятся к низам нижней мантии – глубинам между 2000 и 2900 км.

Особый интерес для томографического изучения представляют недра Земли под Исландией. Как известно, это крупный вулканический остров, расположенный в океане на оси Срединно-Атлантического хребта. Извержения многочисленных вулканов происходят довольно часто и отличаются своей силой. Например, извержение трещинного вулкана Лаки в 1783 году, давшего 12 км³ базальтовой лавы, явилось катастрофой для Исландии, во время которой погибло почти все поголовье овец и лошадей, так как сернистые газы уничтожили кормовую растительность. Очевидно, что относительно неглубоко в верхней мантии располагаются первичные магматические очаги, поставляющие базальтовую магму на поверхность.

Исследования методом сейсмической томографии, проведенные Х. Бивардом и В. Спэкменом и опублико-

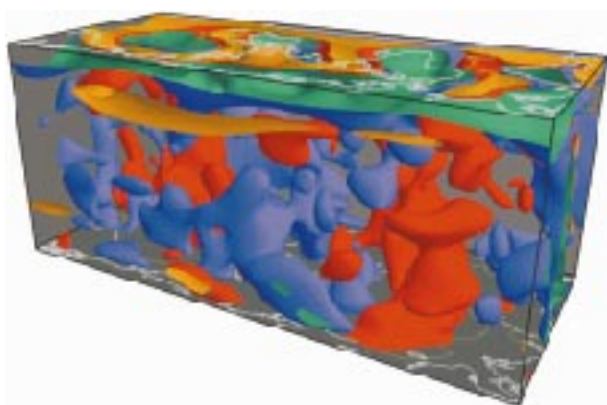


Рис. 2. Томографическое изображение верхней мантии. Контуры континентов показаны на верхнем горизонтальном срезе, красным цветом выделена горячая или “медленная” мантия, фиолетовым – холодная или “быстрая” мантия. Оранжевым цветом на передней вертикальной плоскости показан срез горячей мантии (по: Сю В., Вуодварду Р., Дзевонскому А., 1994)

ванные в 1999 году, показали наличие под Исландией огромного столба или плюма (от слова “плюмаж”) разуплотненной, то есть менее вязкой, мантии, берущего начало почти от границы ядро–мантия с глубин более 2900 км. Средний диаметр плюма составляет около 500 км, хотя на протяжении плюма он колеблется от 300 до 700 км (рис. 3). Сам плюм обладает сложной формой и напоминает столб дыма. Отклонение скоростей сейсмических волн по сравнению со стандартной моделью оценивается всего в $\pm 0,5\%$. Надо отметить, что в несколько более ранней работе К.Дж. Вольфа с соавторами, опубликованной в 1977 году, столбообразный плюм был прослежен только до глубин всего 400 км. Происхождение подобного столба разуплотненной мантии под Исландией пока остается загадкой, так же как и образование похожих плюмов под Гавайскими островами или Йеллоустонским парком на западе Северной Америки, известным своими молодыми вулканами и гейзерами.

Интересные томографические изображения неоднородностей в верхней мантии в Средиземноморье были получены В. Спэкменом, в частности в районе Эгейского моря, который характеризуется высокой сейсмичностью, все еще активным вулканизмом в пределах Кикладской островной дуги и наличием глубоководного Гелленского желоба. Геологические процессы в этом регионе интерпретировались в виде субдукции океанической литосферной плиты в северном направлении. И вот сейсмическая томография блестяще подтвердила это предположение. Действительно, на томографическом разрезе наблюдается пластина повышенной плотности (“быстрая”), что подтверждается увеличением скоростей продольных сейсмических волн на 3%. И эта

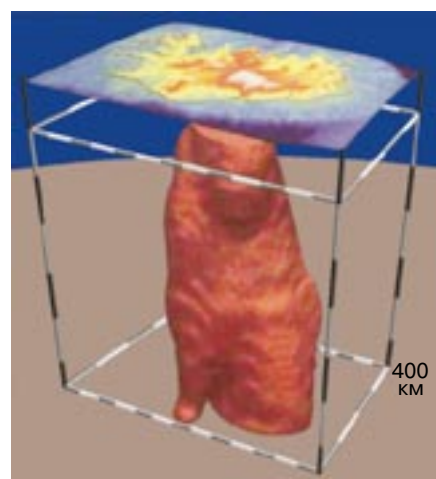


Рис. 3. Столб или плюм горячей (“медленной”) мантии под Исландией до глубин 400 км (по данным Вольфа К. и др., 1997)

пластина мощностью около 250 км погружается под углом 45° глубже 600 км (рис. 4). К ее верхней части к зоне изгиба приурочены гипоцентры землетрясений до глубин 200 км, а севернее над пластиной располагается зона разуплотнения в верхней мантии, где скорости продольных сейсмических волн уменьшаются по сравнению со стандартной моделью также на 3%. Именно к этой области мантийного разуплотнения приурочены активные вулканы Кикладской дуги, например известный Санторин.

Надо отметить, что подобные, весьма впечатляющие картины субдуцирующейся холодной, “быстрой” океанической плиты, погружающейся под континентальную, сейчас выявлены почти во всех островных ду-

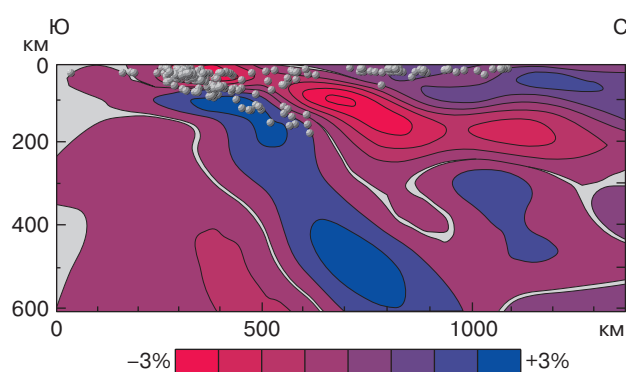


Рис. 4. Томографический профиль через Эллинский желоб, о-в Крит и Эгейское море. Черные кружки – гипоцентры землетрясений. Синим цветом показана пластина погружающейся холодной (“быстрой”) мантии, красным изображена “медленная” мантия (по данным Спэкмена В., 1989)

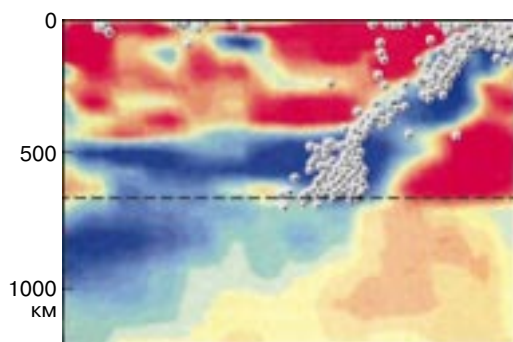


Рис. 5. Остров Фиджи – Дуга Тонга. Томографический профиль (по Вижваарду Х., Спэкмену В., Энгадлю Е., 1998). Хорошо видна холодная темно-синяя (“быстрая”) пластина океанической плиты, погружающейся сначала до границы верхней и нижней мантии (~670 км), а далее как бы скользящей по ней и пересекающей ее. Красные участки – область горячей (“медленной”) мантии. Черные кружки – гипоцентры землетрясений

гах: Камчатской, Курильской, Японской, Марианской, а также в активных окраинах типа Андийской (рис. 5).

ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ

Впечатляющие успехи сейсмической томографии в изучении Земли не должны заслонять от нас использование ее с применением и других хорошо известных геофизических методов: магнитного, гравиметрического, электромагнитного, электрического, акустического, оптического и др. Например, структуру гидросферы можно изучать с помощью высокочастотных (до тысячи герц) акустических волн и также получать трехмерные изображения латеральной и вертикальной неоднородностей водной толщи, особенно разнообразных течений и вихревых структур, известных, например, около главной ветви Гольфстрима.

Можно также проводить изучение атмосферы, которая достижима для электромагнитных, световых и акустических волн. Принцип тот же самый, а вариации плотности в атмосфере, так же как влажности и температуры, весьма значительны. Применение электромагнитного метода для томографического изучения литосферы основано на получении параметров интенсивности поля, частоты колебаний, времени распространения и направленности. Гравиметрия позволяет использовать только один параметр – интенсивность силы тяжести, как, впрочем, и электрический, в то время как в магнитном методе параметров два: интенсивность и направленность. Всеми этими методами также возможно изучение неоднородностей различных оболочек Земли с получением изображений в трехмерном измерении.

Метод сейсмической томографии успешно применяют для разведки месторождений нефти и газа, изучения тонкой геологической структуры между скважинами, рудных залежей и других относительно небольших объектов по сравнению с неоднородностями в мантии Земли. Томографическое изучение детальной структуры между несколькими скважинами в нефтегазоносных районах позволяет воссоздать реальную объемную картину распределения нефтенасыщенных пластов, флюидоупоров, воды и газа. При этом резко возрастает точность попадания скважиной в зону, где скопились нефть или газ. Двух- и трехмерные крупномасштабные томографические изображения представляют особый интерес для геологов-практиков, при разведке месторождений полезных ископаемых, особенно при увеличении добычи углеводородов, так как иногда до 70% нефти остается в нефтесодержащих пластах при ее первичном извлечении, а далее нефть необходимо вытеснять из пласта водой или в случае вязких нефтей паром. Поэтому сейсмическая томография в разведочной геофизике приобретает сейчас первостепенную роль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение в геофизические методы исследования томографии, прежде всего сейсмической, открыло возможности изучения внутренней структуры неоднородностей мантии Земли и более частных внутрикоровых структур. Чем больше объемных и поверхностных сейсмических волн пронизывают недра Земли, чем больше сейсмоприемников их регистрируют и чем мощнее ЭВМ, тем точнее может быть исследована неоднородность в мантии, выявляемая изменением скоростей волн, проходящих через нее. Благодаря сейсмической томографии впервые была получена общая картина структуры конвективных потоков в мантии Земли, которые являются движущим механизмом перемещения литосферных плит. Безусловным открытием было установление горизонтальных или близких к ним “быстрых” и “медленных” неоднородностей мантийного вещества. Геофизическая томография во всех своих разновидностях позволила с гораздо большей точностью устанавливать объемную структуру месторождений полезных ископаемых, в частности нефти и газа, а также выявлять неоднородности в гидро- и атмосфере. Развитие сети современных сейсмостанций и появление быстродействующих ЭВМ позволили “просветить” мантию Земли, что является наиболее впечатляющим достижением.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Короновский Н.В., Абрамов В.А.* Землетрясения: Причины, последствия, прогноз // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 12. С. 71–78.
2. *Аллатов В.В. и др.* Методы оптической томографии для экологии околоземного пространства // Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. С. 288–296.
3. *Андерсон Д.Л., Дзевонский А.М.* Сейсмическая томография // В мире науки. 1984. № 12. С. 16–25.
4. *Былевский Г.А., Петерсилье В.И.* Применение томографии при геофизических исследованиях горных пород: (По зарубежным источникам). М.: МГП “Геоинформмарк”, 1992. С. 37.
5. *Николаев А.В.* Проблемы геотомографии // Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. С. 4–38.

Рецензент статьи Д.Ю. Пушаровский

* * *

Николай Владимирович Короновский, доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. кафедрой динамической геологии геологического факультета МГУ, действительный член РАЕН, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов – региональная и общая геология, геодинамика и магнетизм. Автор более 280 научных статей, нескольких монографий и четырех учебников.