

УДК 550.34.(013.4:03)

ПРОГРАММА “TECTONIX” – ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

К.Ю. Силкин

Воронежский государственный университет

Описывается компьютерная программа “Tectonix”, предназначенная для решения прямой двумерной кинематической сейсмической задачи в области сейсмологии. Приводятся алгоритмы и модель, положенные в основу программы. Работа программы демонстрируется на конкретном примере.

Для достоверной интерпретации результатов сейсмологических наблюдений большое значение имеют обобщенные региональные годографы основных видов упругих волн [1]. Имеющиеся обобщенные для всего земного шара годографы позволяют сейсмологам определять главные параметры очага землетрясения со значительной долей погрешности. С другой стороны, знание кинематических особенностей распространения упругих волн от местных сейсмических событий позволяет получать важную информацию о строении земной коры изучаемого района. Поэтому возникла насущная потребность создания такой компьютерной программы, которая позволяла бы решать прямую кинематическую сейсмическую задачу для моделей, применимых в сейсмологии. Очевидно, что подобные программы ранее уже разрабатывались. Однако, их поиск и приобретение оказываются значительно более проблематичными, чем создание собственного инструмента.

Модели и алгоритмы

Были разработаны алгоритмы и составлена программа расчета сейсмических годографов основных типов упругих волн для случая двумерно неоднородной среды. Наиболее вероятная область ее применения – уточнение решения обратной сейсмической задачи (через решение прямой сейсмической задачи) для оценки особенностей строения крупных геологических районов. Программа “Tectonix” создана в среде и на языке системы компьютерной математики MatLab. Особенно полезной “Tectonix” может быть при региональном и глобальном масштабах исследований особенностей строения коры и более глубоких слоев Земли.

В основе “Tectonix” лежат представления о математической модели геологической среды в общих чертах, сводящиеся к следующему. Сначала фиксируется количество слоев, слагающих изучаемый объект (например, земную кору). Затем путем определения географических координат по произвольной сетке задается набор точек. В этих точках указываются значения мощности слоев, а также скорости продольных и поперечных волн у кровли каждого слоя и величины их вертикальных градиен-

тов. Так задается многослойная трехмерная модель изучаемой геологической среды, разделенная гладкими субгоризонтальными (в общем случае криволинейными) границами раздела. В плане значения скоростей упругих волн в слоях могут изменяться произвольно. В разрезе эти параметры являются линейной функцией глубины.

Такая модель весьма близка к реальной ситуации, наблюдаемой в недрах Земли при региональном или глобальном масштабах исследований. Так, например, континентальная земная кора состоит из, по крайней мере, трех слоев (осадочного, “гранитного” и “базальтового”) [2-4]. Наименьшие значения скорости сейсмических волн отмечаются у дневной поверхности – кровли осадочного слоя (от нескольких сотен м/с до первых км/с). Наблюдается заметная изменчивость состава и состояния осадочных горных пород, что, в свою очередь, приводит к наличию соответствующей горизонтальной вариации и скорости распространения волн. Значительно выше значения упругих параметров в кристаллическом фундаменте – у кровли гранитного слоя скорость продольных волн близка к 6 км/с. В нижнем этаже земной коры – базальтовом слое – скорость продольных волн ещё больше, достигая 7 км/с и более. Подобная горизонтальная расслоенность практически всегда бывает осложнена субвертикальными зонами глубинных разломов, рассекающих земную кору на отдельные блоки. Это приводит к чередованию повышенных значений упругих параметров в блоках и пониженных между ними. И, наконец, так как с увеличением глубины возрастает давление вышележащих горных пород, то для земных недр характерно постепенное увеличение скорости сейсмических волн. Степень увеличения скорости с глубиной чаще всего описывается линейным законом.

Целесообразно использовать данную программу совместно с результатами сейсмологических наблюдений. Регистрируемые данные – сейсмограммы – представляют собой суперпозицию целой пачки волн различной физической природы [1,4]. Чаще всего наблюдаются прямые продольные и поперечные волны, а также поверхностные волны Рэлея и Лява. Их идентификация на сейсмограммах обычно не вызывает трудностей. Кроме того, неред-

ко выделяются и другие колебания – прямые рефрактированные (продольные и поперечные) волны, многочисленные виды отраженных волн (монотипных и обменных, однократно и многократно отраженных), возникающих на границе кора-мантия (границе Мохоровичича, М) и внутрикоровых границах (границы Конрада, K_1 и K_2). Эти волны имеют разную интенсивность и наблюдаются на фоне ранее пришедших колебаний, но несут много ценной информации о строении и состоянии земных недр. Важной актуальной задачей является создание критерия определения природы регистрируемых при каждом событии колебаний.

“Tectonix” позволяет получать годографы большинства из упомянутых выше волн. Если, используя имеющиеся априорные геолого-геофизические данные по изучаемому региону, построить его обобщенную математическую модель, то с помощью разработанной программы можно будет рассчитать региональные годографы основных волн. Это и даст упомянутый критерий идентификации волн. В дальнейшем можно будет провести более детальное изучение структурных и динамических особенностей земной коры. Для этого понадобится осуществление итерационного моделирования с целью решения обратной сейсмической задачи по данным регистрации крупных карьерных взрывов и местных землетрясений.

Вычисления годографов производятся с помощью лучевого метода [5], который хорошо зарекомендовал себя при условии отсутствия в модели неоднородностей с размером меньше длины волны. Поскольку не предполагается использовать программу для моделей локального масштаба (меньше нескольких километров), то это ограничение в нашем случае не имеет принципиального значения.

Сначала производится вертикальный срез исходной трехмерной модели плоскостью, проходящей через “источник” и “приёмник”. Затем из “источника” в сторону “приёмника” выпускается пучок равноотстоящих друг от друга лучей. Каждый из них поочередно трассируется через модель с соблюдением закона Снеллиуса [6] (1), определяющего степень отклонения луча от первоначального направления при переходе через границу между участками модели с различными упругими параметрами.

$$\frac{V_{p_1}}{\sin \alpha_p} = \frac{V_{p_2}}{\sin \beta_p} = \frac{V_{s_1}}{\sin \alpha_s} = \frac{V_{s_2}}{\sin \beta_s}, \quad (1)$$

где символ “1” относится к среде, находящейся над (слева) границей, “2” – под (справа) границей; α_p , α_s , β_p , β_s – углы, составляемые между лучами волн P_{11} , P_1S_1 , P_{12} , P_1S_2 с нормалью к границе соответственно; P_{11} , P_1S_1 – отражённые продольная и поперечная волны соответственно; P_{12} , P_1S_2 – преломленные продольная и поперечная волны соответственно; V_{p_1} , V_{p_2} , V_{s_1} , V_{s_2} – скорости распространения продольных и поперечных волн.

Те лучи, которые выходят на поверхность и составляют рассчитываемый годограф.

Для такой сложной модели, которая используется в “Tectonix”, не может быть аналитического выражения уравнения сейсмического луча. Поэтому используются численные методы вычисления. При этом традиционная схема лучевого метода [5] была видоизменена следующим образом. Изначально предполагается, что в каждом слое модели упругие параметры есть гладкие непрерывные функции пространственных координат. Границы между слоями являются границами первого рода – скорости волн на них изменяются скачкообразно.

Далее, задаваясь величиной шага дискретизации модели по полярным координатам (эпицентральному расстоянию D и радиусу R с началом в центре Земли), производится разбиение каждого слоя на относительно малые ячейки. Верхняя и нижняя стороны ячейки являются концентрическими дугами, а боковые – радиусами, исходящими из центра Земли. В пределах каждой ячейки упругие параметры принимаются постоянными и равными тем значениям, которые соответствуют геометрическому центру ячейки. Таким образом, модель среды представляется в виде набора небольших ячеек, разделённых границами первого рода. Сейсмический луч, прошедший через такую модель, становится ломаной линией, которая будет приближаться к плавной линии при устремлении к нулю размера ячейки. Время пробега волны вдоль этого луча будет определяться (2):

$$t = \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{V_i}, \quad (2)$$

где N – количество ячеек, через которые проходит сейсмический луч; l_i – длина прямолинейного отрезка луча в пределах i -й ячейки; V_i – скорость сейсмических волн соответствующего типа в i -й ячейке.

Важной особенностью программы “Tectonix” является учет сферичности Земли. Это необходимо в связи с тем, что программу можно использовать для анализа волновых полей на расстояниях от нескольких десятков до 1000 и более километров и неучет сферичности Земли может привести к большим ошибкам. В таких условиях расстояние между “источником” и “приёмником” называют эпицентральной дистанцией и измеряют в градусах угла между радиусами, проведенными из центра Земли к “источнику” и “приёмнику”.

Не менее ценным для практики моделирования является также широкий спектр возможностей “Tectonix” по визуализации, как исходных данных, так и полученных результатов. Имеется возможность представить в виде сечений трехмерную модель среды и ее проекцию на вертикальную плоскость, проходящую через профиль, вдоль которого будет производиться расчет годографов. Результаты вычислений представляются в виде графиков годографов, изображенных на единой прямоугольной координатной сетке. Кроме того, для облегчения

Параметры модели среды

D	Осадочный чехол			“Гранитный” слой			“Диоритовый” слой			“Базальтовый” слой			Верхняя мантия		
	H	V	dV/dz	H	V	dV/dz	H	V	dV/dz	H	V	dV/dz	H	V	dV/dz
0,0	9,02	2,0	0,4	7,66	6,6	0,015	7,30	6,9	0,005	10,94	7,5	0,015	30,08	8,2	0,011
0,5	8,84	2,0	0,4	11,34	6,6	0,015	7,30	6,9	0,005	10,94	7,5	0,015	30,08	8,2	0,011
1,0	5,03	2,0	0,4	11,56	6,6	0,015	6,22	6,9	0,005	4,80	7,5	0,015	33,80	8,3	0,006
1,5	6,87	2,0	0,4	5,56	6,6	0,015	5,11	6,9	0,005	16,40	7,5	0,015	26,90	8,4	0,002
2,0	6,78	2,0	0,4	6,77	6,5	0,015	8,55	6,9	0,005	17,34	7,5	0,015	26,68	8,3	0,003
2,5	6,47	2,0	0,4	5,82	6,5	0,015	4,74	6,9	0,005	21,82	7,6	0,015	24,89	8,2	0,030
3,0	8,89	2,0	0,4	3,71	6,2	0,015	7,30	6,7	0,005	23,30	7,5	0,015	22,11	8,0	0,020
3,5	9,07	2,0	0,4	7,61	6,4	0,015	6,63	6,6	0,005	20,52	7,5	0,015	25,25	8,2	0,030
4,0	10,01	2,0	0,4	6,31	6,5	0,015	3,27	6,6	0,005	20,48	7,2	0,015	24,57	8,0	0,015
4,5	8,57	2,0	0,4	4,89	6,6	0,015	3,22	6,7	0,005	17,21	7,0	0,015	28,25	7,8	0,040

D – эпицентральное расстояние (°), H – мощность слоя (км), V – скорость продольных волн (км/с), dV/dz – вертикальный градиент скорости продольных волн (с⁻¹)

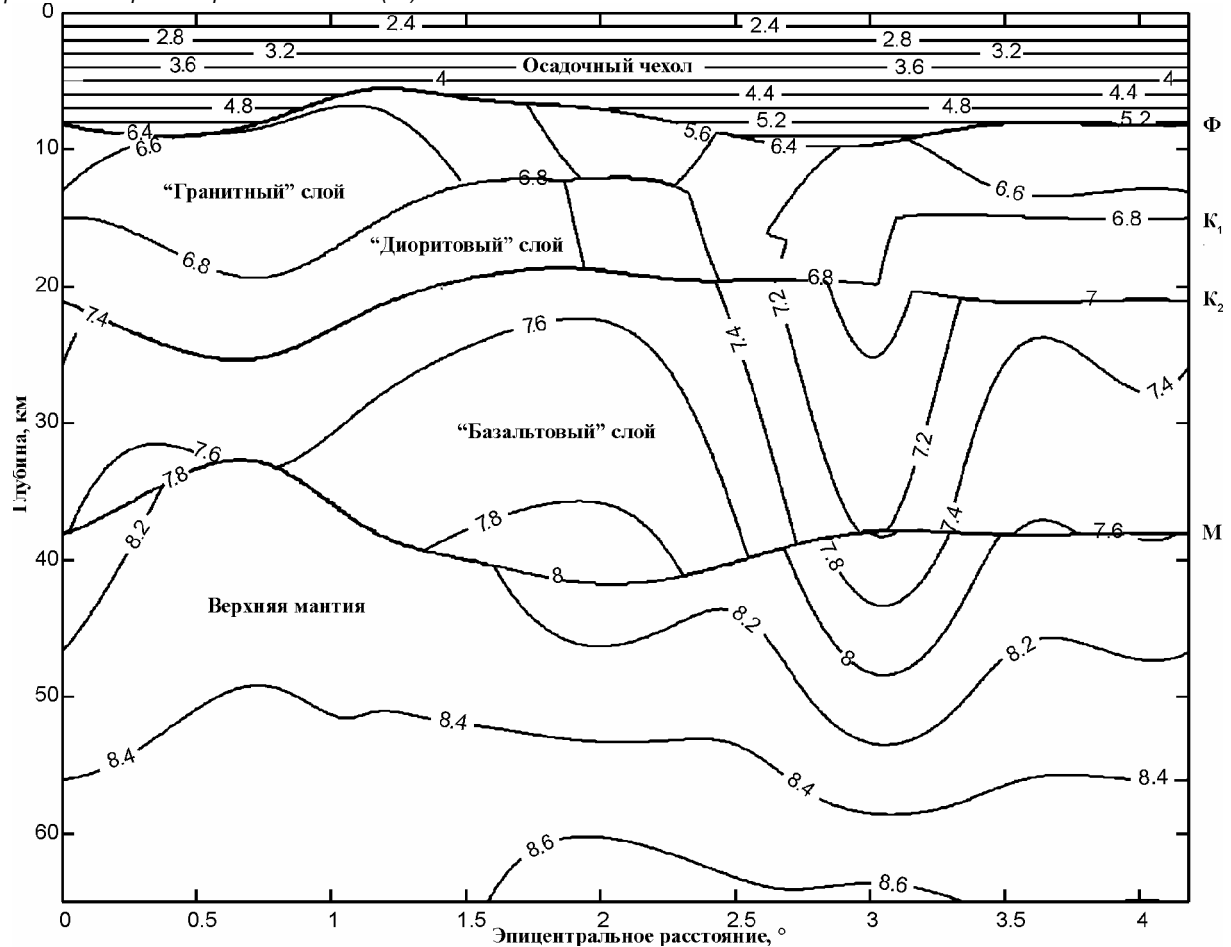


Рис. 1. Распределение скоростей продольных волн в земной коре, используемое в модельном примере. Границы между слоями земной коры: Φ – кровля кристаллического фундамента; K₁, K₂ – внутрикоровые границы Конрада (K₁ – кровля, K₂ – подошва “диоритового” слоя); M – граница Мохоровичича (между земной корой и мантией). Подписи изолиний даны в км/с.

понимания особенностей поведения годографов могут быть изображены и траектории лучей.

Пример

Рассмотрим работу программы на примере строения земной коры восточной окраины Восточно-Европейской платформы [2]. По табл. и рис. 1 можно видеть, что земная кора этого региона представляется состоящей из осадочного чехла мощностью от 5 до 10 км и кристаллического фундамента,

общая мощность которого колеблется от 23 до 35 км. Фундамент сложен тремя слоями с сильно искривленными границами между ними. Условно эти горизонты называются “гранитный”, “диоритовый” и “базальтовый”. Земная кора залегает на слое, относящемся к верхней мантии. Протяженность модели около 4,5° (приблизительно 450 км).

Скоростная характеристика модели (рис. 1) крайне неоднородна. Проще всего устроен осадочный чехол. В нем упругие параметры приняты не-

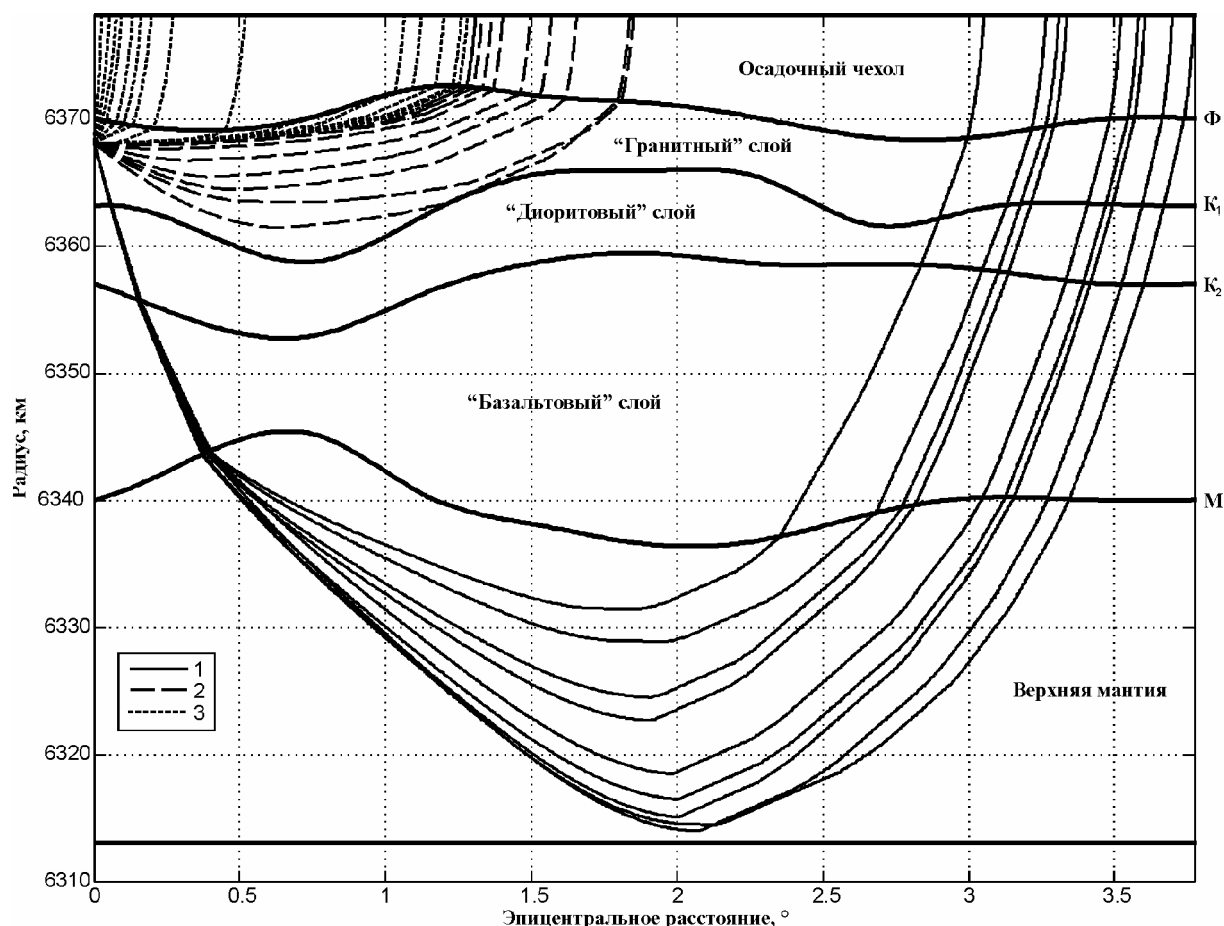


Рис. 2. Траектории лучей некоторых рефрагированных и прямой волн при глубине источника 10 км: 1 – рефрагированная волна из верхней мантии, 2 – рефрагированная волна из “гранитного” слоя, 3 – прямая волна (часть рефрагированной волны из “гранитного” слоя с лучами, поднимающимися из источника вверх). Обозначения границ см. в подписи к рис. 1.

изменными по латерали (2 км/с у поверхности). Благодаря большому вертикальному градиенту ($0,4 \text{ с}^{-1}$) скорость увеличивается к основанию чехла до 4 км/с над выступами фундамента и до 6 км/с во впадинах. Скоростная характеристика кристаллического фундамента гораздо сложнее. При относительно небольших значениях вертикального градиента скорости ($0,005 - 0,04 \text{ с}^{-1}$) наблюдается большая вариация как значений скорости у кровли слоев, так ее градиента. Особое внимание привлекает зона глубинного разлома, наблюдаемая на $D = 3^\circ$. Она характеризуется пониженными (на величину до 0,6 км/с) значениями скорости во всем фундаменте и верхней мантии и повышенным градиентом скорости (в 2,4 раза) в верхней мантии.

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета траекторий распространения некоторых видов объемных сейсмических волн, по которым можно получить наглядное представление о возможностях программы “Tectonix”. Рис. 2 иллюстрирует особенности распространения рефрагированных волн (возвращающихся из верхней мантии и гранитного слоя) и восходящей прямой волны при расположении источника (очага) на глубине 10 км от дневной поверхности. Рефрагированные волны возникают в градиентных средах [6], поэтому можно было бы

рассчитать траектории лучей и для остальных слоев фундамента, но, чтобы не усложнять изображение, это не сделано. Можно видеть, что рассчитанные траектории значительно отличаются как от прямолинейных, так и от круговых, что связано с неравномерными изменениями скорости по вертикали и латерали. Волна, обозначенная на рис. 2 как прямая является продолжением рефрагированной волны из гранитного слоя, так как ее лучи также искривляются из-за вертикального градиента скорости, но выходят из источника с положительными углами, то есть вверх. Рефрагированная волна имеет только отрицательные углы выхода. Такое разделение, разумеется, условно и сделано для облегчения понимания получающихся результатов. Кроме того, при раздельном расчете этих волн есть возможность задавать различные способы испускания лучей из источника для каждой из них. Так лучи рефрагированной волны образуют равномерно распределенный веер. В то же время угловой промежуток между соседними лучами прямой волны прогрессивно изменяется от $0,05^\circ$ до 15° при переходе от горизонтального к вертикальному направлению распространения. Это сделано в связи с тем, что чем ближе точка выхода луча к источнику, тем меньше расстояние от точки выхода соседнего луча. Поэтому постоянный

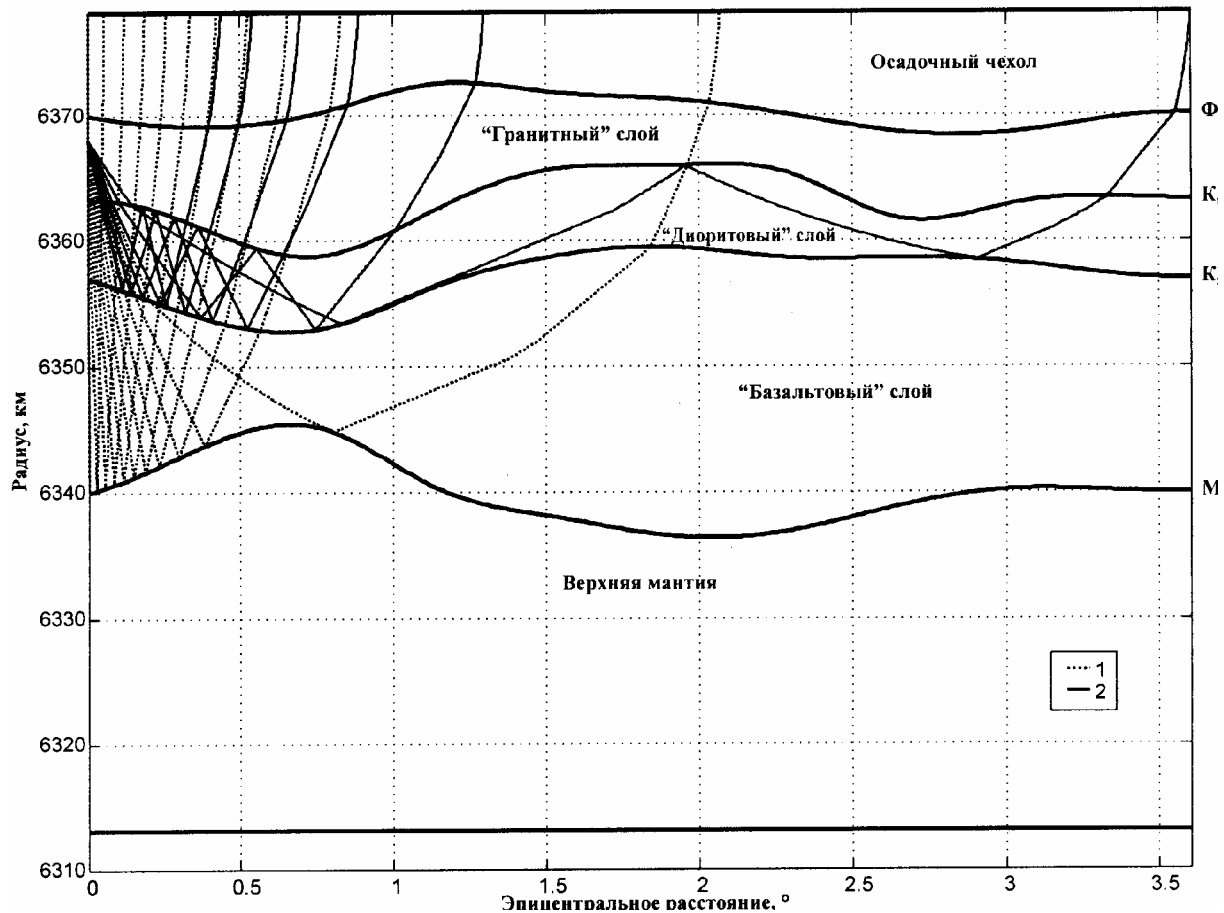


Рис. 3. Траектории лучей некоторых отраженных волн при глубине источника 10 км: 1 – однократно отраженная волна от подошвы земной коры, 2 – многократно отраженная волна от границ “диоритового” слоя. Обозначения границ см. в подписи к рис. 1.

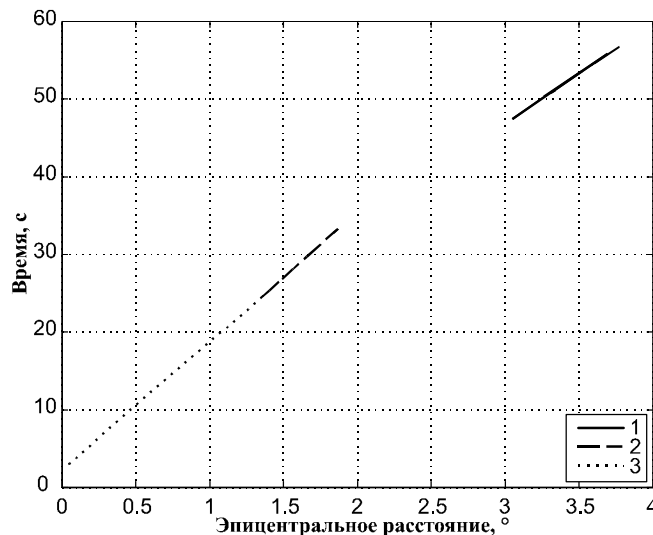


Рис. 4. Годографы волн, траектории распространения которых показаны на рис. 2. Обозначения волн см. в подписи к рис. 2.

угловой шаг между лучами будет либо недостаточным (вдали от источника), либо чрезмерным (вблизи).

Не менее интересно распространение отраженных волн из того же источника (рис. 3). Были рассчитаны траектории лучей волны однократно отраженной (от границы) М и волны трижды отра-

женной (от границ K_2 , K_1 , K_2). Для упрощения картины лучи кратноотраженной волны рассчитаны только начиная с угла выхода из источника равного -45° . В реальности такие волны возникают и при углах выхода от -90° (к центру Земли).

Значительно усложняют картину структурные особенности модели, проявляющиеся в значительном изменении мощности всех слоев земной коры. Например, почти десятикилометровый подъем границы М, ось которого наблюдается на $D = 0,7^\circ$, не позволяет мантийной рефрагированной волне появляться ближе 3° . В то же время крупный выступ “диоритового” слоя в центре модели значительно сокращает распространение рефрагированной волны в “гранитном” слое. Аналогично возникает зона тени и для отраженной от границы М волны – из-за сильно сокращенной (вблизи $D = 0,7^\circ$) мощности “базальтового” слоя она не может распространяться дальше $D = 2,07^\circ$. И только кратная волна благодаря множественности отражений имеет возможность проникать за почти любые преграды.

Годографы, соответствующие лучевым траекториям, приведенным на рис. 2 и 3, представлены на рис. 4 и 5 соответственно. На рис. 4 видно, что годографы всех рассчитанных рефрагированных волн

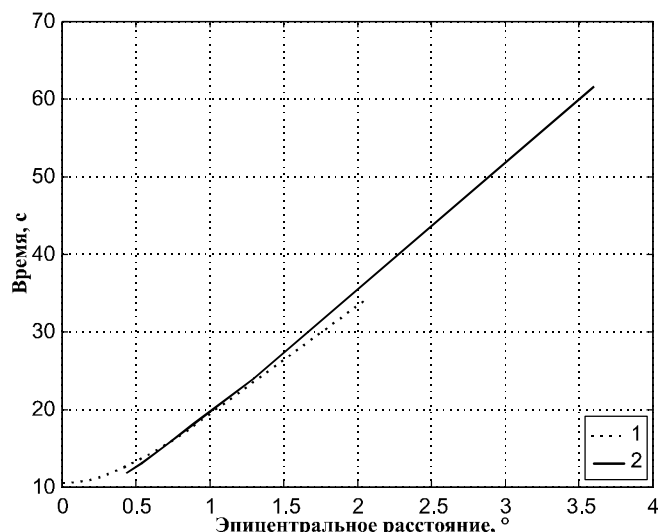


Рис. 5. Годографы волн, траектории распространения которых показаны на рис. 3. Обозначения волн см. в подписи к рис. 3.

лежат практически на одной прямой, но мантийная волна имеет меньший наклон, что объясняется большей скорости упругих волн в мантии. Промежуток протяженностью более 1° между рефрагированной волной из “гранитного” слоя и из верхней мантии связан с тем, что не производился расчет подобных волн из других слоев. Как можно видеть на рис. 5 годографы двух отраженных волн, образующихся на разных глубинах, значительно перекрываются на интервале от $0,5^\circ$ до $1,5^\circ$, что, очевидно, усложнит анализ реального волнового поля. Это связано с наличием трех актов отражения у кратной волны.

Выводы

Как можно видеть из приведенного примера, программа “Tectonix” обладает рядом возможностей, которые могут быть использованы в процессе

интерпретации результатов сейсмологических наблюдений. Если взять результаты сейсмологических исследований земной коры ВКМ и близлежащих районов, то можно будет составить региональные годографы основных волн для разных глубин “источника”. При этом достаточно ограничиться несколькими направлениями, из которых к воронежским станциям обычно прибывают волны от сейсмических событий. Такие годографы дадут возможность значительно точнее определять глубину очага и надежнее проводить идентификацию регистрируемых волн. Таким образом, “Tectonix” может стать тем инструментом, который позволит получить дополнительную информацию о строении, составе и состоянии земной коры.

Также “Tectonix” может найти применение в учебном процессе, так как позволит студентам-геофизикам получить наглядное представление о строении Земли и особенностях распространения сейсмических волн через те или иные ее части.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ и CRDF, грант № VZ-010-0

ЛИТЕРАТУРА

1. Саваренский Е.Ф., Киринос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. – М., 1955. – 543 с.
2. Тяпкин К.Ф. Физика Земли. – Киев, 1998. – 312 с.
3. Земная кора и верхняя мантия / Под ред. Е.В. Артюшкова и др. – М., 1972. – 640 с.
4. Стейси Ф. Физика Земли. – М., 1972. – 342 с.
5. Корягин В.В., Сахаров Ю.П. Математическое моделирование в сейсморазведке / Отв. Ред. О.К. Глотов, Н.А. Трапезникова. – М., 1988. – 154 с.
6. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М., 1981. – 464 с.
7. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле / А.Л. Левшин, Т.Б. Яновская, А.В. Ландер и др. – М., 1986. – 278 с.