

УДК 550.34.(013.4:03)

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ СКОРОСТНЫЕ МОДЕЛИ ВКМ

А.И. Дубянский, К.Ю. Силкин

Воронежский государственный университет

Для определения параметров эпицентров и очагов местных землетрясений рассчитаны по скоростным моделям региональные годографы объемных Р- и S-волн. При построении региональных скоростных моделей использовались представительные материалы глубинных сейсмических исследований земной коры и верхней мантии по территории Воронежского кристаллического массива. Прямые задачи решались с использованием программы «Tectonix»

Установленная сейсмическая активность региона [1,2] делает необходимым создание и использование при интерпретации записей местных землетрясений годографов волн, отражающих в общем плане специфику геологического строения земной коры Воронежского кристаллического массива. Задача построения региональных годографов решалась в следующей последовательности:

- 1) построение осредненных годографов объемных Р- и S-волн и оценка дисперсии времен прихода;
- 2) решение обратной задачи с использованием осредненных годографов;
- 3) коррекция параметров скоростной модели;
- 4) вычисление годографов для различных глубин источников сейсмических колебаний.

Решение задачи построения региональных годографов волн облегчает то обстоятельство, что на территории ВКМ выполнен в разные годы большой объем глубинных сейсмических исследований, дающих информацию об особенностях строения земной коры различных частей региона. Методика этих работ была основана на использовании энергии промышленных взрывов, проводимых в карьерах КМА и в Павловском гранитном карьере.

В результате полевых наблюдений, последующей обработки и интерпретации оценены характеристики волнового поля продольных и, в ряде случаев, поперечных волн, построены скоростные модели и сейсмические разрезы земной коры вдоль 18 профилей. Эти профили пересекают практически все крупные структурно-формационные зоны докембрийского фундамента ВКМ, каждая из которых имеет свои характерные особенности строения земной коры и верхов мантии. Все это свидетельствует о достаточной представительности имеющегося сейсмического материала [3,4].

Обобщение сейсмических материалов осуществлялось на уровне годографов, которые оцифровывались с шагом 5 км. В обработку были включены рефрагированные волны Pg, Pn, Sg и отраженные волны от основных границ в земной коре Pk<sub>1</sub>, Pk<sub>2</sub>, Pk, Pm, Sk и Sm. Оцифрованные годографы этих волн осреднялись и вычислялось среднеквадратическое отклонение времен прихода от среднего, которое для волн Pg и Pn, следящихся в первых вступлениях, составляет соответственно 0,06с и 0,011с. Примерно на том же уровне находится разброс значений времен регистрации волны Pk<sub>1</sub> (0,09с). Не-

сколько большие отклонения от среднего отмечаются для годографа волны Pk<sub>2</sub> (0,27с), что связано с большими вариациями в гипсометрическом уровне кровли «диоритового» слоя. Среднеквадратическое отклонение от среднего времен прихода продольных волн, отраженных от границ К и М одинаково и составляет 0,17с. В поле S-волн исходный материал менее представительен. Прослеживаются волны Sg, Sk и Sm. Среднеквадратические отклонения времен их регистрации от среднего соответственно равны 0,11, 0,12 и 0,06 с.

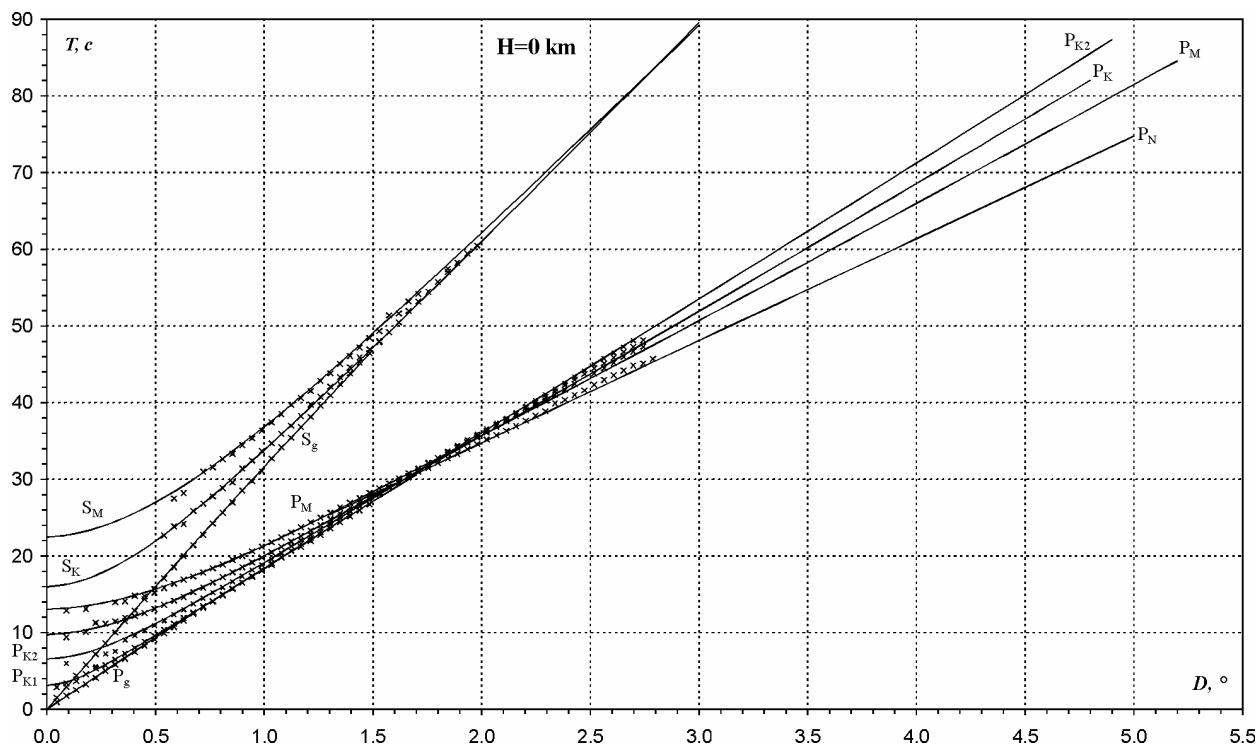
Вычисление параметров скоростной модели проводилось по следующей схеме:

1. По годографам рефрагированных волн Pg и Sg оценивались начальная скорость, градиент скорости и глубина максимального проникания при заданном значении расстояния взрыв-прибор для линейного закона изменения скорости с глубиной.

2. По годографам отраженных волн методом квадратичных координат определялись эффективные скорости,  $t_0$  и эффективная глубина под пунктом взрыва. Аппроксимация квадратичного годографа прямой линией проводилась методом наименьших квадратов.

3. Эффективные скорости, с учетом данных по рефрагированным волнам для верхних интервалов разреза, пересчитывались в пластовые и строилось первое приближение скоростной модели. Параметры модели корректировались в результате сравнения решения прямой задачи и осредненных годографов. Решение прямой задачи выполнялось с использованием программы «Tectonix» [5].

Программа «Tectonix» создана в среде и на языке системы компьютерной математики MatLab R12. Она предназначена для расчёта сейсмических годографов основных типов упругих волн (отраженных, преломленных, рефрагированных, обменных и др.), распространяющихся в трёхмерно неоднородной среде, которая представлена слоями, разделёнными гладкими криволинейными границами раздела. Слои описываются набором точек, путём указания их географических координат. В этих точках указываются значения мощности слоёв, а также скорости продольных и поперечных волн у кровли каждого слоя и величины их вертикальных градиентов. По латерали значения скоростей упругих волн в слоях могут изменяться произвольно. В программе используются численные методы вычисления. Для



**Рис. 1. Годографы основных типов объемных волн.** Глубина источника 0 км (на поверхности).  $D$  – эпицентральное расстояние,  $R$  – радиус Земли. Крестиками показаны экспериментальные данные

их реализации 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.

Вычисления годографов производятся с помощью лучевого метода. Из «источника» в сторону «приёмника» выпускается пучок равноотстоящих друг от друга лучей. Каждый из них поочередно трассируется через модель с соблюдением закона Снеллиуса, определяющего степень отклонения луча от первоначального направления при переходе через границу между ячейками с различными упругими параметрами.

Результаты вычислений представлены в виде годографов (рис. 1, 4–6) и схем траекторий лучей (рис. 2, 3). Сравнение наблюдаемых и рассчитанных данных показало хорошее их соответствие (рис. 1). Для годографов всех волн разброс фактических времен относительно теоретических годографов не превышает 0,3 с.

Рассматриваемые модели соответствуют годографам, времена которых приведены к уровню моря. Окончательные региональные скоростные модели построены от рельефа дневной поверхности и дополнены скоростной характеристикой осадочных образований, перекрывающих кристаллический фундамент. Кроме того модель распределения по вертикали скоростей S-волн дополнена информаци-

ей о скоростях ниже границы M, которые рассчитывались с учетом отношения  $V_p/V_s$ , взятым из работы [6]. Для осадочного комплекса пород отношение скоростей P- и S-волн бралось равным 2 [7]. Параметры окончательной региональной скоростной модели приведены в таблице.

Региональная модель земной коры ВКМ состоит из пяти основных слоев. Верхний из них, представленный породами осадочного комплекса, имеет среднюю мощность 500 м. Скорость продольных и поперечных волн в этой части разреза составляет соответственно 1,8 и 0,9 км/с. В верхней части консолидированной коры до глубины порядка 10 км отмечается слой, в котором скорость P-волн линейно нарастает с глубиной от 5,95 до 6,29 км/с. Градиент скорости составляет  $0,036 \text{ с}^{-1}$ . В этом же слое градиент скорости S-волн меньше ( $0,019 \text{ с}^{-1}$ ), диапазон изменения скорости 3,47-3,65 км/с. Кровлей и подошвой градиентного слоя являются соответственно границы Ф и  $K_1$ . Следующая устойчивая сейсмическая граница ( $K_2$ ) выделяется на глубине 20,5 км. В поле S-волн эта граница не прослежена. Скорость P-волн в этой части региональной модели равна 6,30 км/с. Судя по значениям пластовых скоростей градиентный и нижележащий слои сложены породами гранитоидного ряда. В интервале глубин от 20,5 до 32 км (границы  $K_2$  и K) скорость продольных волн увеличиваются до 6,7 км/с, что свидетельствует об увеличении основности слагающих эту часть разреза пород. Между границей K (Конрада) и разделом Мохо (M), который имеет глубину залегания 44 км, выделяется «базальтовый» слой, скорости упругих P- и S-волн в котором составляют 7,2 и 4,0 км/с. Под разделом M скорость возрастает до

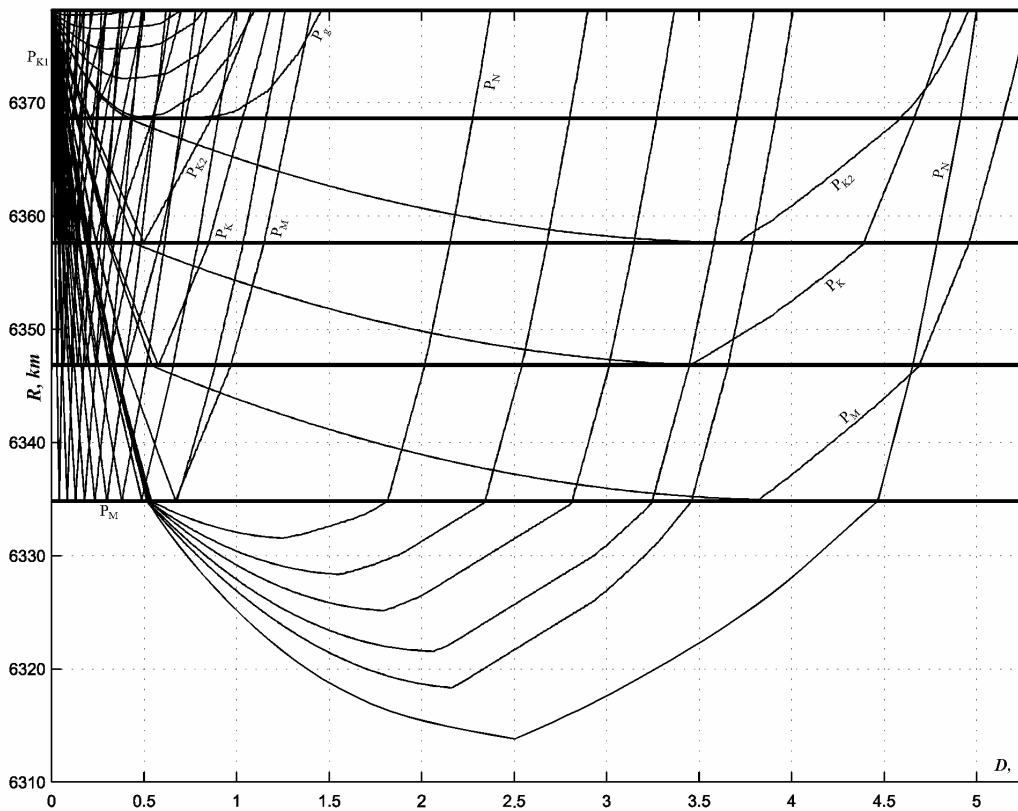


Рис. 2. Траектории лучей продольных волн для годографов, изображенных на рис. 1

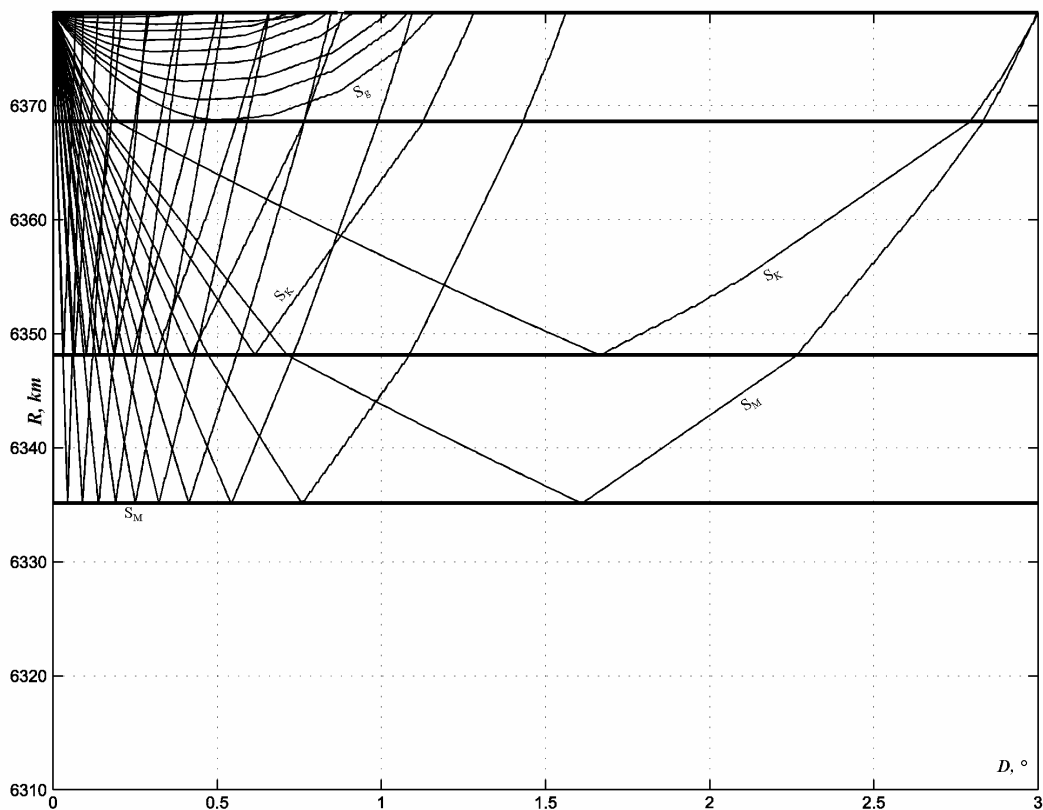


Рис. 3. Траектории лучей поперечных волн для годографов, изображенных на рис. 1

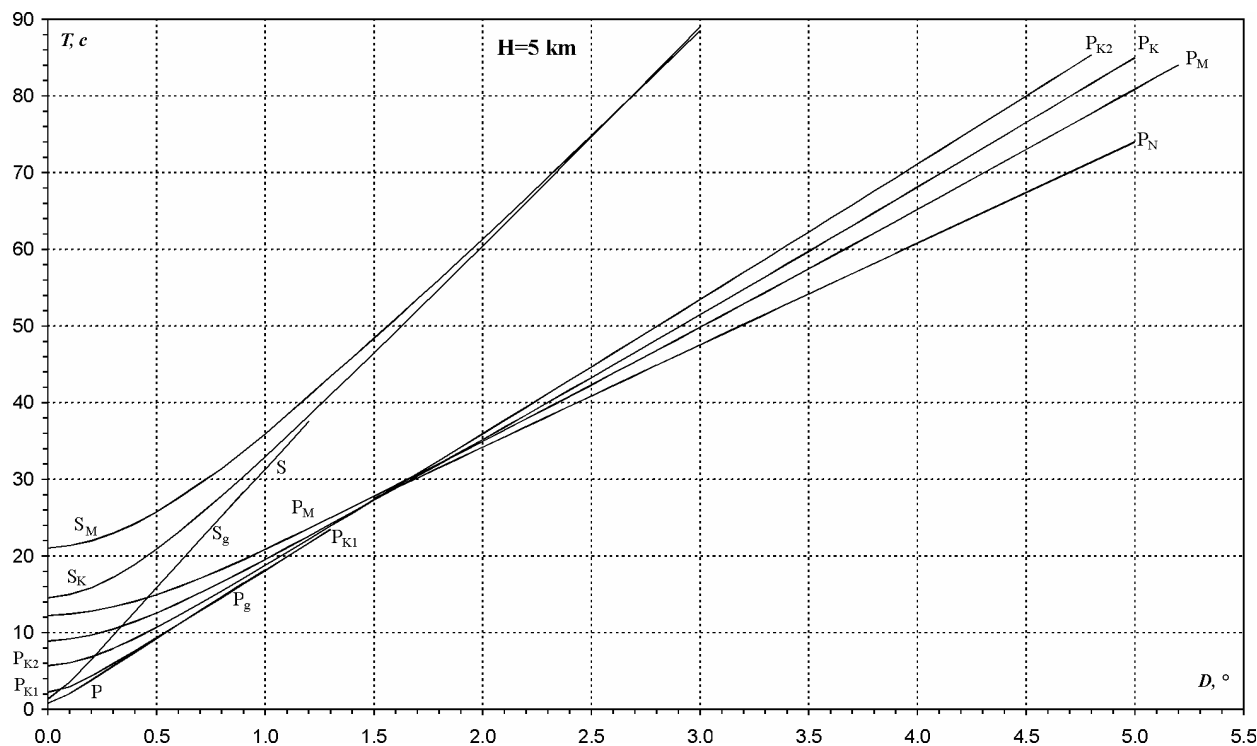


Рис. 4. Годографы основных типов объемных волн. Глубина источника 5 км

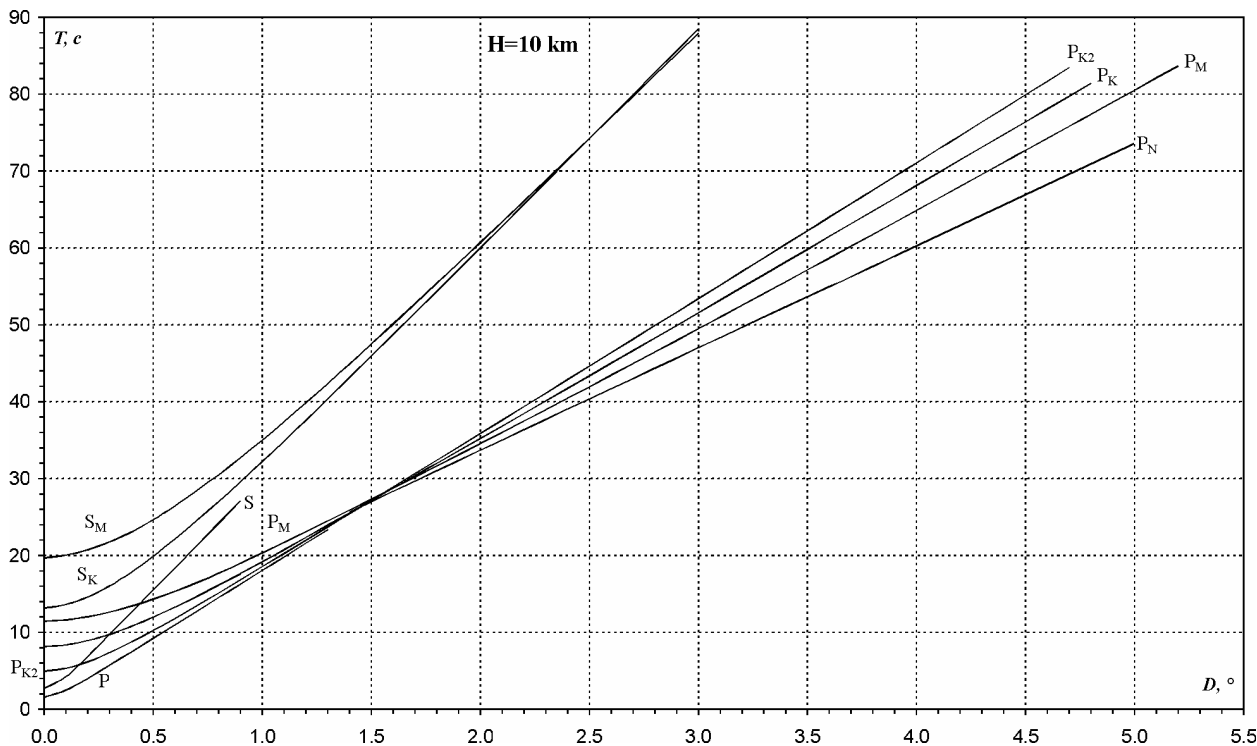


Рис. 5. Годографы основных типов объемных волн. Глубина источника 10 км

типично мантийных (8,1 и 4,57 км/с). Следует отметить, что границы  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K$  и  $M$  являются регионально выдержанными, что является специфической особенностью земной коры Воронежского кристаллического массива.

Региональные скоростные модели использовались при расчете годографов рефрагированных и отраженных волн для различных глубин источников упругих колебаний. На рис. 4–6 в качестве примера

приведены годографы, вычисленные для источников на глубине 5, 10 и 20 км соответственно, которые демонстрируют характер изменения регулярных особенностей волнового поля. Соотношения времен прихода различных волн, определенные по этим годографам, позволяют находить пространственное положение эпицентров сейсмических событий, которые произошли в пределах Воронежского кристаллического массива.

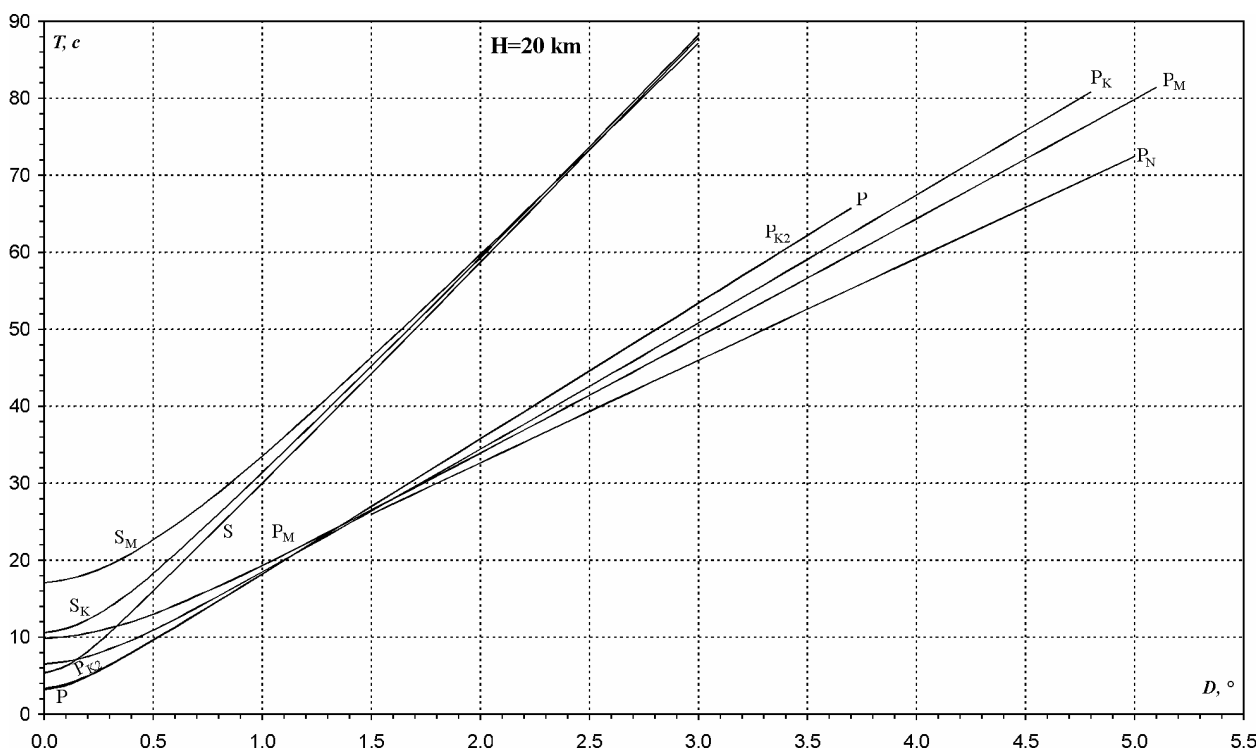


Рис. 6. Годографы основных типов объемных волн. Глубина источника 20 км

Таблица

Параметры скоростной модели

Индекс границы	Распределение скоростей				$V_P/V_S$
	P-волн		S-волн		
	$H_i$ , км	$V_{Pi}$ , км/с	$H_i$ , км	$V_{Si}$ , км/с	
Ф	0,0	1,80	0,0	0,90	2,00
	0,5	1,80	0,5	0,90	2,00
	0,5	5,95	0,5	3,47	1,71
K <sub>1</sub>	10,0	6,29	10,0	3,65	1,72
	10,0	6,30	10,0	3,84	1,67
K <sub>2</sub>	20,5	6,30	—	—	—
	20,5	6,70	—	—	—
K	32,0	6,70	30,5	3,84	1,67
	32,0	7,20	30,5	4,00	1,80
M	44,0	7,20	43,5	4,00	1,80
	44,0	8,10	43,5	4,57	1,77
	60,0	8,35	60,0	4,72	1,77

ЛИТЕРАТУРА

1. Надежка Л.И., Дубянский А.И., Кашубин С.Н., Скребнев А.В. Сейсмичность Воронежского кристаллического массива // Сборник научных трудов Национальной горной академии Украины. Геофизика. -№ 6. - Т. 3. - Днепропетровск, 1999. - С. 73-75.
2. Надежка Л.И., Дубянский А.И., Сафронич И.Н., Скребнев А.В. Сейсмический режим Воронежского кристаллического массива // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. -2000. -№ 9. - С. 209-215.
3. Надежка Л.И., Дубянский А.И., Тарков А.П. и др. Результаты глубинных исследований на Воронежском кристаллическом массиве // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Тез. докл. на международ. конф. - Воронеж, 1996. - С. 117-118.
4. Дубянский А.И. Глубинное строение Воронежского кристаллического массива по данным взрывной сейсмологии: Автореф дис. ... канд. геол.-минер. наук. - Свердловск, 1984. - 21 с.
5. Силкин К.Ю. Программа «Tectonix» - инструмент для решения прямой кинематической сейсмологической задачи // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. - № 1. - 2003. - С. 135-141.
6. Tarkov A.P., Basula I.P., Generalov V.G., Dubiansky A.I., Chernykh V.V Composite travel times of seismic waves and general velocity models of Voronesh Shield crust and upper mantle // Geophys J.R. astr. Soc. 67. - 1981. - P. 137-143.
7. Петрофизика. Справочник в трех книгах / Под ред. Н.Б. Дортман. - М., 1992. - Кн. 1. - С. 391. - Кн. 2. - С. 256. - Кн. 3. - С. 286.