

УДК 550.344.63 + 550.344.094.5 (571.66)

## СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПОД КАМЧАТКОЙ

**С. А. Федотов, Л. Б. Славина, Л. С. Шумилина,  
А. А. Гусев**

*Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР, Петропавловск-Камчатский;  
Институт физики Земли АН СССР, Москва*

В настоящей работе способом кажущихся скоростей оцениваются скорости продольных волн в верхней мантии под восточной Камчаткой. Установлено, что скорости продольных волн в этом районе изменяются от 7,0 до 8,0 км/с, в среднем скорость равна 7,6 км/с. Изменение скорости по площади носит полосовой характер. Полосы протягиваются вдоль Камчатки. Наибольшие скорости наблюдаются в районе Срединного хребта и в Кроноцком заливе. Средние скорости характерны для долины р. Камчатки. Низкие скорости чаще приурочены к вулканическим районам.

Задача работы — выделение скоростных зон в верхней мантии под Камчаткой, уточнение положения области низких скоростей в верхних слоях мантии [8], выявление связи с активными вулканическими поясами Камчатки, а также выяснение характера изменения скорости от одной скоростной зоны к другой и построение карт полей скоростей.

Исследования особенностей распределения скоростей в верхней мантии в районе Курило-Камчатской островной дуги и прилегающих областей Тихого океана проводилось ранее [1, 3, 5, 6, 7]. Полученные скоростные разрезы характеризуют свойства мантии между Тихоокеанской фокальной зоной и прибрежной полосой островной дуги, где в основном расположены станции. Основные результаты этих исследований сводятся к следующему. Под островными дугами обнаружены пониженные скорости в верхних слоях мантии ( $V_p = 7,6 - 7,7$  км/с). Под океаном скорости выше ( $V_s = 8,2 - 9,0$  (?) км/с). В более глубоких слоях континентального блока, под островными дугами, скорости в среднем близки к скоростям стандартной модели Джейффриса. Здесь возможно наличие нескольких волноводов. Некоторая разница в скоростях океанического и континентального блоков сохраняется [9].

Первая попытка оценки скоростей в верхней мантии под Камчаткой произведена методом  $v^*$  С. А. Федотовым, Л. Б. Славиной [8].

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе скорости получены по сетке трасс — пара станций — эпицентр, не лежащих строго на одной прямой. Поэтому было не совсем ясно, к какому участку трассы относить полученное значение. На втором этапе выдерживалось строгое профильное, продольное расположение станций и эпицентров.

В задачу второй части работы входила проверка и уточнение карты скоростей, полученной на первом этапе. Первая часть выполнена Л. Б. Славиной, вторая — Л. С. Шумилиной. Обе карты выполнялись под руководством и при непосредственном участии С. А. Федотова.

Для удобства описание модификаций методики расчета на двух

этапах дано последовательно. А обсуждение результатов описано совместно.

На первом этапе работы использованы времена пробега волн  $P$  от более 250 местных землетрясений с глубиной очага  $H=0—30$  км, энергией  $K^{\phi 38}=10—14$ , классом точности по глубине и эпицентру  $ab\pm 5—10$  км. Были выбраны 11 групп эпицентров, в каждую из которых входило 10—50 землетрясений с близкорасположенными очагами. Местоположение групп выбиралось таким образом, чтобы обеспечить встречные и нагоняющие наблюдения по отдельным трассам, а также достаточно густую сетку трасс, покрывающую различные тектонические районы Камчатки. Размещение групп: с юга — 1 (юг Авачинского залива), 2 (у мыса Лопатка), 3 (район о-ва Парамушир); с севера — 4 (район Кроноцкого полуострова), 8 (север Камчатского залива), 11 (Озерновский залив), 10 (район мыса Шипунского); на суше — 6 (район вулкана Шивелуч), 7 (Козыревский хребет), 5 (район р. Щапиной), 11к (хр. Кумроч) (рис. 1).

Единичные значения определялись для каждого землетрясения по разностям первых вступлений  $P$ -волны на пару станций и разностям их эпицентральных расстояний. Для каждой группы землетрясений подбирались все возможные пары станций с расстоянием между ними (база измерения)  $>50$  км, эпицентральное расстояние до ближней станции  $\geq 150$  км. Строгое профильное расположение станций и эпицентра на одной прямой не выдерживалось. Среднее значение угла между направлениями центр группы — станции составляло  $\sim 12^\circ$ . Углы  $\sim 30^\circ$  составляли 10% от общего числа. Значения  $v^*_i$ , полученные по единичным землетрясениям для одной пары станций и одной группы, осреднялись, оценивалась дисперсия единичного и среднего значения. Значения  $\bar{v}^*$  по отдельным трассам для пар станций и центров групп представляют основной результативный экспериментальный материал.

Интерпретация и осреднение полученных значений  $v^*$  проводились несколькими способами. Приведем способ, позволивший получить осредненные карты и схемы скоростей.

Сделано предположение, что измеренные скорости  $\bar{v}^*$  относятся к площади, заключенной между парой станций и серединами трасс сейсмических лучей (измеренных от центра группы) (рис. 2, а). Вся исследуемая область была разбита на сетку квадратов со стороной 25 км. Каждый квадрат попадал внутрь десятков разных площадей, для которых получены оценки  $\bar{v}^*$ . Для каждого узла квадрата находилось среднее значение  $\bar{v}^*_{ik}$ . Всего на площади было размещено 280 узлов-точек. По средним значениям  $\bar{v}^*_{ik}$  для каждой точки построены карты и схемы скоростей. Выбранный способ осреднения позволил получить достаточно приближенные, сильно слаженные карты-схемы скоростей продольных волн в верхних слоях мантии под Камчаткой. Тем не менее основные характеристики поля скоростей определены достаточно устойчиво. К сожалению, вопрос о глубинах, к которым относятся полученные оценки скоростей, остается неопределенным. Очевидно, что на расстояниях  $\Delta=150—650$  км при средней мощности коры  $\sim 30$  км в первых вступлениях наблюдаются волны из мантии. Малое увеличение средних значений скоростей с расстоянием в этом диапазоне  $\Delta$  показывает, что рефракция волн мала. Учитывая это обстоятельство и то, что использовались очаги с глубиной до 30 км, можно условно отнести полученные оценки скоростей к глубинам от 30 до 50 (70) км. Получен градиент скорости  $0,0008 \text{ с}^{-1}$  при средних значениях скоростей 7,6 и 7,77 км/с. При увеличении перепада скоростей, что наблюдается на ряде трасс, градиент может быть выше, примерно  $0,0012—0,0014 \text{ с}^{-1}$ , и глубина проникновения луча больше. Карта скоростей  $v^*_p$  была построена для

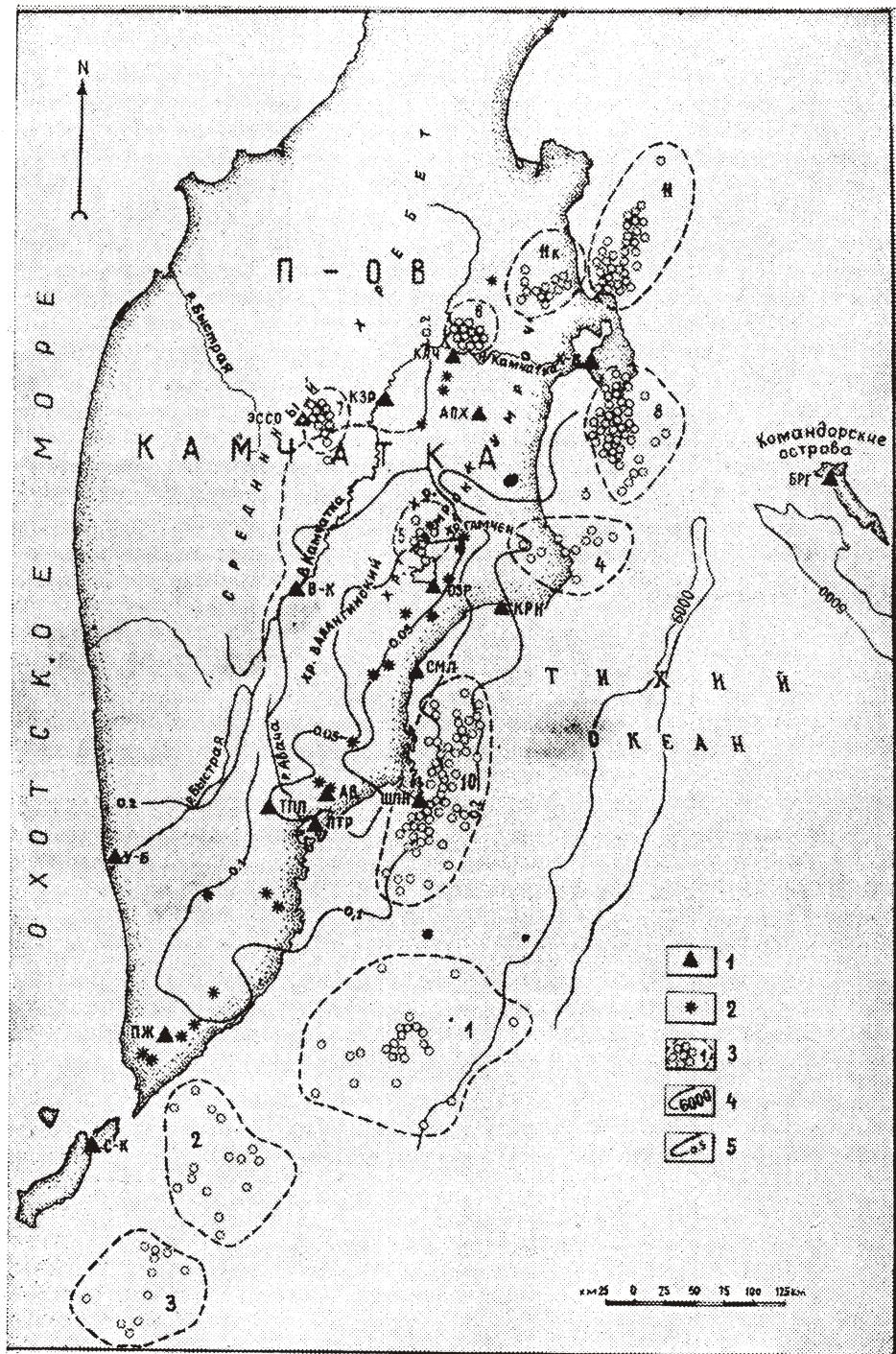


Рис. 1. Карта района исследования: 1 — сейсмические станции; 2 — действующие вулканы Камчатки; 3 — группы эпицентров, использовавшиеся для оценки  $v^*$ ; 4 — изобаты; 5 — изолинии среднеквадратичного уклона скоростей  $\sigma$ .

эпицентральных расстояний  $\Delta = 150—650$  км. Для расстояний  $\Delta = 150—400$  и  $\Delta = 400—650$  км построены схемы полей скоростей.

Карта-схема поля скоростей для  $\Delta = 150—650$  дана на рис. 3. Остановимся на точности проведения изолиний скоростей. По значени-

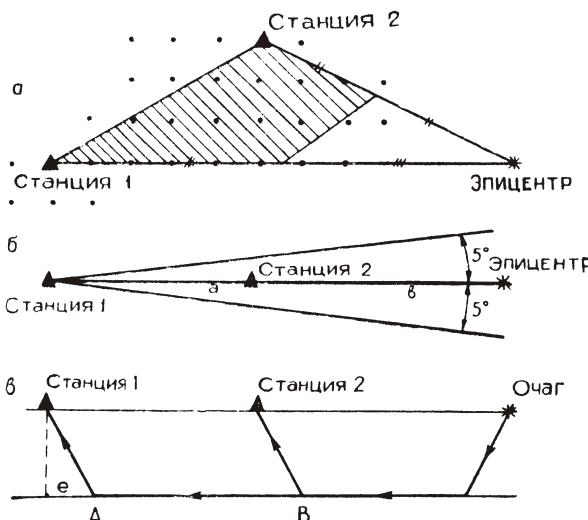


Рис. 2. Схема взаимного расположения станций и эпицентра: а — осреднение по площади в первом варианте; б — расположение станций и эпицентра во втором варианте; в — условная схема распространения волн для второго варианта

Тихого океана (рис. 4). Использовались материалы детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке за 1965—1971 гг. [2], всего 822 землетрясения, погрешность определения координат которых  $\pm 10$  км. Землетрясения выбирались таким образом, чтобы эпицентр и две любые станции из 16, имеющихся на Камчатке, лежали на одной прямой. Отклонение эпицентра от этой прямой допускалось в пределах угла 5° по обе стороны от профиля (рис. 2, б). Для профиля Шипунский—Кроноки эпицентры располагались в пределах угла 10°. Глубины очагов большинства выбранных землетрясений изменялись от 0 до 20 км, а для четырех профилей в пределах 30 км. Средняя глубина очагов — 10 км. Расстояние между парой станций (а) не менее 50 км. Расстояние (б) от эпицентра до ближайшей к нему станции больше 150 км (рис. 2, б). Расстояние от эпицентра до середины отрезка между парой станций изменялось для разных профилей от 175 до 450 км и в среднем равнялось 280 км. На нескольких профилях проверено изменение кажущейся скорости с увеличением расстояния. В диапазоне расстояний 175—450 км изменение кажущихся скоростей было в пределах точности. Следовательно, регистрируемые в первых вступлениях волны, для которых определялась кажущаяся скорость, в первом приближении скользящие или слабо рефрактированные волны, характеризующие верхние слои мантии.

Полученное значение кажущейся скорости можно отнести к отрезку АВ между точками отрыва луча (рис. 2, в). Величина сейсмического сноса (e) при этом принята равной 30 км. Эта оценка дана из предположения, что мощность коры 30 км, средняя скорость в коре — 6,0 км/с, средняя скорость в верхних слоях мантии — 7,6 км/с [4].

Всего построено 43 профиля. Число землетрясений на каждом профиле изменялось от 10 до 50, менее 10 эпицентров использовано для 16 профилей. Для каждого профиля и землетрясения определялась кажущаяся скорость на отрезке АВ. Затем определялась средняя кажущаяся скорость как среднеарифметическое из определений по многим землетрясениям.

Для каждого профиля сделаны оценки точности определения еди-

ям среднеквадратичных ошибок, рассчитанных для каждого узла сетки, построена карта среднеквадратичных ошибок. Наименьшая  $\sigma$  характерна для центральной части Камчатки (см. рис. 1) — контур изолинии 0,05. На площади за пределами изолинии 0,10 на карте скоростей изолинии проведены через 0,2 км/с.

На втором этапе работы кажущаяся скорость определялась по продольным профилям, пересекающим в различных направлениях восточную Камчатку, от Срединного хребта до побережья

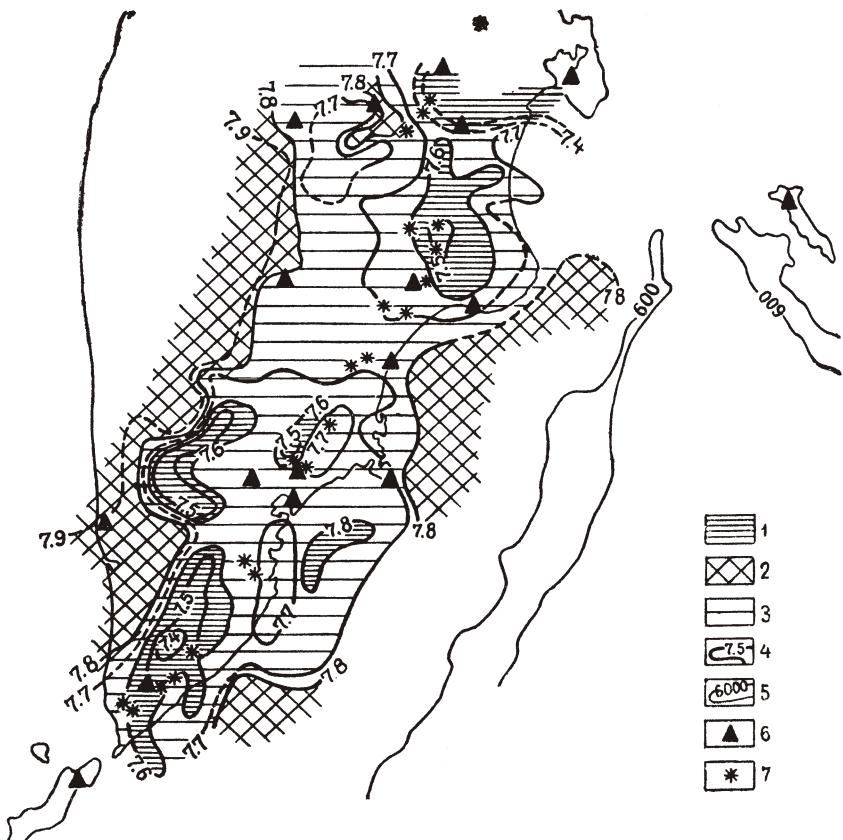


Рис. 3. Карта-схема поля скоростей  $v^*P$  в верхней мантии под Камчаткой по I варианту для  $\Delta=150-650$  км: 1 — области с  $v^*P=7,6-7,3$  км/с; 2 — области с  $v^*P=7,8$  км/с; 3 — области с  $v^*P=7,6-7,8$  км/с; 4 — изолинии скоростей  $v^*P$ ; 5 — изобаты; 6 — сейсмические станции; 7 — действующие вулканы Камчатки

ничного измерения кажущейся скорости и среднего значения кажущейся скорости. Точность определения единичного измерения составила в среднем по всем профилям 0,36 км/с, точность среднего — 0,1 км/с.

Сведения по профилям даны в таблице.

Среди всех пар станций для трех определены значения кажущейся скорости по встречным профилям (Тпл — ВК, Шпн — Крн, Крн — КБ).

На карте с кажущимися скоростями по профилям (см. рис. 4) выделены семь зон, в каждую из которых попадали профили с близкими значениями скоростей.

1 — область Срединного хребта. Профили, идущие на станцию Эссо, дают повышенные ( $\sim 8,0$  км/с) значения кажущейся скорости. Скорость в этой области обозначена  $v_1$ .

2 — область Ключевской группы вулканов. Характеризуется профилями с аномально низкими ( $\sim 6,8$  км/с) скоростями. Скорость  $v_2$ .

3 — область долины р. Камчатки и Восточных хребтов. Объединяет профили с кажущейся скоростью 7,7 км/с. Скорость  $v_3$ .

4 — область вулканического пояса и побережья Тихого океана. Характеризуется профилями со скоростью  $\sim 7,5$  км/с. Скорость  $v_4$ .

5 — южное окончание Камчатки. Скорость  $v_5$ .

6 — область Камчатского залива. Скорость  $v_6$ .

7 — область Кроноцкого залива. Скорость  $v_7$ .

**Сводка основных данных по профилям**

Станции — на- правление на эпицентр →	Количество землетрясе- ний, $n$	Расстояние между стан- циями, $\delta\Delta$ (км)	Эпизентраль- ное расстоя- ние, до даль- ней станции, $\Delta$ (км)	Среднее зна- чение кажу- щейся скоро- сти, $v^*$ (км/с)	Точность	
					единичного значения, $\sigma$	среднего значения, $\bar{\sigma}$
Эссо — Кэр	38	76	278	7,81	0,72	0,38
Тпл — Птр	42	46	173	7,40	0,76	0,12
Кэр — Аpx	9	60	274	6,67	0,34	0,12
Эссо — Аpx	21	130	364	7,61	0,74	0,16
Кэр — Клч	46	68	227	6,80	0,38	0,06
Эссо — Озр	10	176	378	7,99	0,37	0,12
Тпл — Шпн	19	134	283	7,30	0,27	0,06
Птр — Шпн	22	93	246	7,65	0,51	0,11
Авч — Шпн	10	88	252	7,28	0,37	0,12
Клч — Озр	20	185	395	7,74	0,16	0,03
Аpx — Озр	25	150	358	7,56	0,21	0,04
Кэр — Озр	6	156	345	7,64	0,19	0,08
Шпн — Крн	52	182	369	8,08	0,25	0,05
Крн — Шпн	8	182	407	8,00	0,13	0,05
КБ — Крн	8	208	523	7,69	0,09	0,03
Крн — КБ	8	208	349	7,56	0,15	0,05
Авч — Крн	48	217	402	7,54	0,21	0,03
Птр — Крн	31	239	436	7,61	0,19	0,03
Авч — Смл	45	123	400	7,55	0,21	0,03
Птр — Смл	27	147	431	7,73	0,28	0,05
Аpx — Смл	5	217	470	7,70	0,12	0,05
Клч — Смл	16	252	429	7,86		
Кэр — Смл	16	216	406	7,67	0,25	0,06
Тпл — Смл	19	159	424	7,69	0,38	0,09
Тпл — Крн	14	254	445	7,50	0,26	0,07
Смл — Крн	12	96	286	7,06	0,76	0,22
Эссо — Смл	14	219	388	7,86	0,17	0,04
ВК — Озр	14	125	297	7,49	0,36	0,09
Смл — Шпн	38	112	281	7,36	0,74	0,12
ВК — Крн	7	175	310	7,50	0,22	0,08
ВК — Смл	8	114	253	7,65	0,85	0,32
ВК — Аpx	20	213	408	7,17	0,54	0,12
Клч — Бгч	13	162	442	7,48	0,25	0,07
Аpx — Бгч	8	126	406	6,78	0,49	0,17
ВК — Тпл	8	157	377	7,68	0,56	0,20
Тпл — ВК	5	157	322	7,71	0,20	0,09
Эссо — Тпл	13	300	566	7,93	0,27	0,08
Эссо — ВК	9	144	520	8,02	0,62	0,21
Пжт — Шпн	7	284	504	7,49	0,23	0,08
Пжт — Птр	8	212	561	7,56	0,22	0,08
Пжт — Авч	9	237	676	7,84	0,52	0,17
УБ — Тпл	6	125	288	7,78	0,09	0,04
Тпл — Озр	29	222	444	7,74	0,29	0,05

Проведены предположительно границы этих областей и составлены для каждого профиля уравнения типа

$$\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{v_i} = \frac{l}{v^*},$$

где  $l_i$  — отрезок профиля в области  $i$ , который проходит волну со скоростью  $v_i$ ;

$l$  — общая длина профиля;

$v^*$  — кажущаяся скорость на этом профиле (всего 43 уравнения).

Последовательным решением групп уравнений для каждой области найдены скорости для всех семи областей. Окончательная схема распределения скоростей показана на рис. 5.

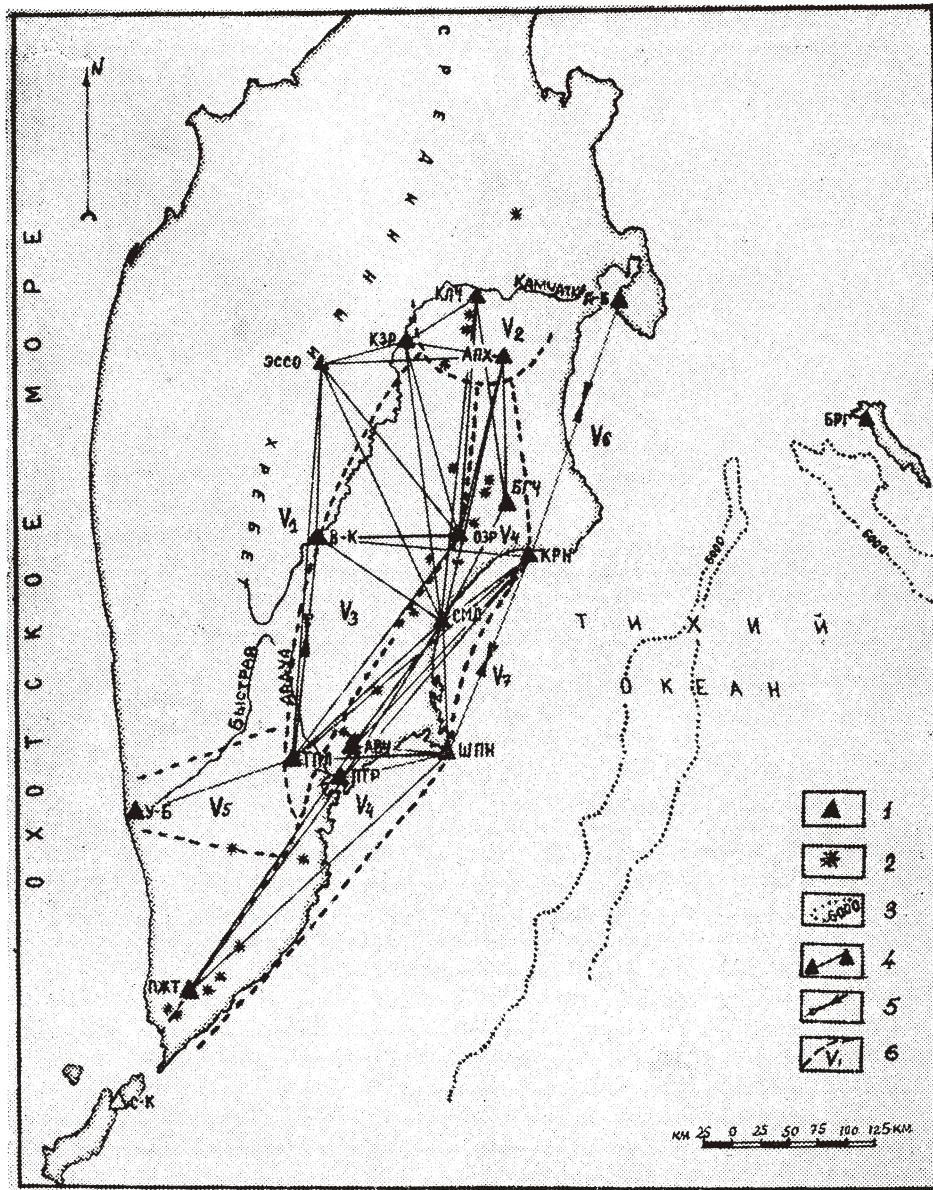


Рис. 4. Схема расположения профилей и скоростных областей: 1 — сейсмические станции; 2 — действующие вулканы; 3 — глубоководный желоб; 4 — профили; 5 — профили, на которых кажущиеся скорости определены по встречным направлениям; 6 — границы скоростных областей с обозначением скорости в них

Для того чтобы оценить достоверность полученных значений скоростей, была решена обратная задача: по известным скоростям в областях вычислить кажущиеся скорости по профилям и сравнить их с экспериментальными. Отличия расчетных кажущихся скоростей от экспериментальных оказались в пределах точности определения экспериментальных значений. Для удобства расчета оценивались не скорости по профилям, а времена пробега. Оказалось, что среднее по всем 43 профилям отклонение расчетного времени пробега от экспериментального — 0,38 с. Точность же определения экспериментального времени — 0,33 с. При проверке решения для областей с  $v_3$  и  $v_4$  по 16 уравнениям,

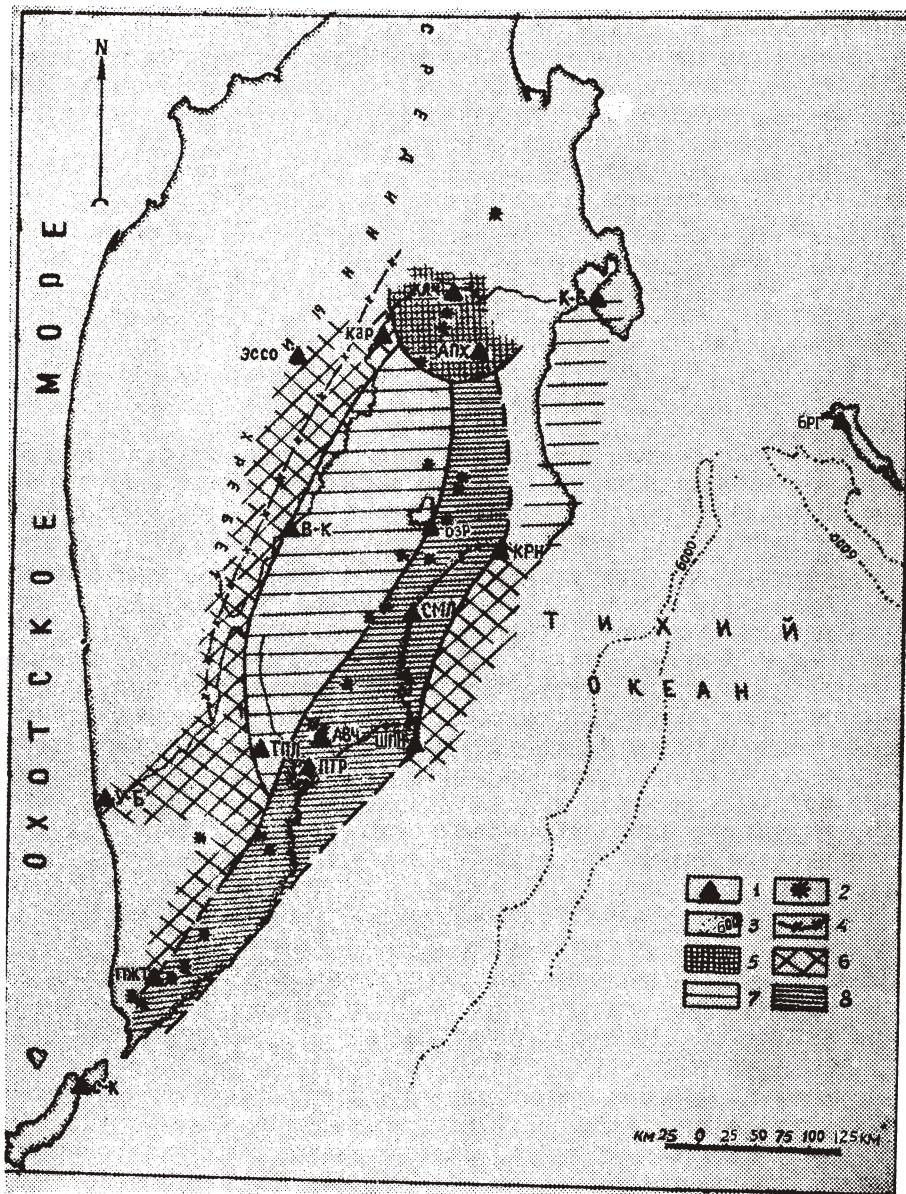


Рис. 5. Схема скоростного строения верхних слоев мантии восточной Камчатки по II варианту: 1 — сейсмические станции; 2 — вулканы; 3 — глубоководный желоб; 4 — Центрально-Камчатский разлом; 5 — скорость 6,8—7,0 км/с; 6 — скорость 8,0—8,1 км/с; 7 — скорость 7,6—7,7 км/с; 8 — скорость 7,4—7,5 км/с

не участвовавшим в определении значений этих скоростей, получилось, что отклонение расчетного времени пробега от экспериментального — 0,4 с, а точность определения экспериментального — 0,3 с. Близость этих двух результатов может быть в какой-то мере показателем достоверности построенной схемы.

Таким образом, в результате работ, проведенных двумя модификациями способа  $v^*$ , мы получили два варианта карт-схем скоростного строения верхних слоев мантии под восточной Камчаткой. Обе карты сходны по общему характеру поля скоростей и различаются только в деталях.

Для всей исследуемой территории от Срединного хребта Камчат-

ки до побережья Тихого океана скорость в среднем равна 7,6 км/с.

По площади скоростное строение верхних слоев мантии неоднородно. Изменение скоростей вдоль Камчатки полосового характера

Область скоростей, близких к средним (7,6—7,7 км/с), охватывает долину р. Камчатки и Восточные хребты.

Резко повышена скорость (до 8,0 км/с) в Срединном хребте. Изменение скорости от долины р. Камчатки к Срединному хребту происходит скачком от 7,6 до 8,0 (8,24) км/с. Восточная граница этой зоны, по-видимому, приурочена к разлому, отделяющему Срединный хребет от депрессии долины р. Камчатки.

Скорости под заливами вдоль восточного побережья Камчатки неодинаковы. Камчатский залив характеризуется средней скоростью 7,6 (по первому способу 7,5 км/с), Авачинский залив, точнее его западная часть, — низкой — 7,5 км/с (по первому способу на фоне скорости 7,6 км/с выделяются участки более низких скоростей).

В Кроноцком заливе наблюдаются повышенные скорости до 7,8—7,9 км/с. По второму способу в заливе наблюдается высокий градиент скоростей в направлении с востока на запад, от 8,0 км/с в океане до 7,0—7,5 в прибрежной зоне.

Различие двух карт-схем наблюдается в области восточной окраины вулканического пояса и прибрежной полосы Тихого океана. В первом варианте карты-схемы скоростей эта область характеризуется скоростями —7,6 км/с. Участки со скоростями 7,3—7,5 км/с занимают небольшую площадь и имеют характер локальных минимумов, приуроченных обычно к зонам вулканов, но не составляющих единой полосы. Это Авачинско-Корякская зона (7,5 км/с), район Ганальского хребта (7,4 км/с), поле эфузивного вулканизма на юге Камчатки (7,3 км/с), хребты Кумроч и Тумрок (7,5 км/с).

Во втором варианте эта область пока рассматривается единой и характеризуется низкой скоростью —7,5 км/с. Выделение этой области на данном этапе обусловлено близостью значений скоростей на профилях. В дальнейшем предполагается детализировать строение этой области, применив более точные методы обработки исходных данных.

Для области Ключевской группы вулканов в обоих вариантах характерна удивительно низкая скорость в мантии —7,0 км/с (и ниже). Цифра нуждается в проверке, но пока у нас нет дополнительных данных, противоречащих такой оценке.

Естественно, предлагаемые варианты карт скоростного строения верхних слоев мантии восточной Камчатки достаточно схематичны. При их построении выделены самые основные скоростные закономерности, не учтены возможные станционные особенности, границы отдельных скоростных зон достаточно субъективны, а детали карт требуют проверки.

Для построения более надежной и качественной карты скоростей необходимо по имеющемуся экспериментальному материалу решить обратную задачу. А. А. Гусевым составлена программа решения обратной задачи на ЭВМ. Реализована двухмерная задача: строится горизонтальное поле скоростей. На первом этапе лучи считаются прямолинейными, среда в пределах одной скоростной области — однородной. Разбиение на скоростные области проводится с учетом геологического строения района. Число областей пока не слишком велико. Методом наименьших квадратов решается система уравнений, в которых неизвестными являются скорости в областях и станционные члены. Проведен пробный счет по этой программе. Определены скорости по 10 областям. Значения скоростей лежат в диапазоне 7,1—8,1 км/с. Станционные члены изменяются от 0 до 1,5 с. Квадратичное уклонение — 0,3 км/с и 0,4 с соответственно.

## Выводы

В результате проведенных исследований получено представление о характере изменения скорости  $v^*_p$  в верхних слоях мантии под Камчаткой на глубинах 30—50 (30—70) км.

Скоростное строение верхних слоев мантии изменчивое и сложное. Существенные вариации скоростей продольных волн в мантии в исследуемом районе происходят в направлении с востока на запад.

Полученные карты скоростей приближенные и сильно сглаженные. Границы выделенных скоростных зон условны. Машинный перебор данных по программе для решения обратной задачи в двухмерном пространстве, по всей вероятности, может дать более детальные сведения о границах отдельных зон и распределении скоростей продольных волн в верхней мантии под Камчаткой.

## ЛИТЕРАТУРА

- Болдырев С. А. О некоторых свойствах фокальной зоны. На примере фокальной зоны курило-камчатских землетрясений. Настоящий сборник.
2. Землетрясения в СССР в 1965—1971 годах. М., «Наука», 1968—1974.
3. Кузин И. П. Скорости в фокальной зоне Камчатки.—«Изв. АН СССР», сер. «Физика Земли», № 5, 1973.
4. Строение земной коры в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану. М., «Наука», 1964.
5. Тараканов Р. З. Годографы Р и S—Р и скоростной разрез верхней мантии Земли по данным наблюдений над курило-камчатскими землетрясениями.—«Изв. АН СССР», сер. «Физика Земли», № 7, 1965.
6. Федотов С. А., Кузин И. П. Скоростной разрез верхней мантии в области южных Курильских островов.—«Изв. АН СССР», сер. «Геофизика», № 5, 1963.
7. Федотов С. А., Матвеева Н. Н., Тараканов Р. З., Яновская Т. Б. О скоростях продольных волн в верхней мантии в области Японских и Курильских островов.—«Изв. АН СССР», сер. «Геофизика», № 8, 1964.
8. Федотов С. А., Славина Л. Б. Оценка скорости продольных волн в верхней мантии под северо-западной частью Тихого океана и Камчаткой.—«Изв. АН СССР», сер. «Физика Земли», № 2, 1968.
9. Tagakano R. Z., Levy N. V. A model for the upper mantle with several of low velocity and strength. The crust upper mantle of the Pacific Area.—A. G. U. Monogr. 12, Washington, 1968.

## THE UPPER MANTLE LONGITUDINAL WAVE VELOCITIES BENEATH KAMCHATKA

S. A. Fedotov, L. B. Slavina, L. S. Shumilina, A. A. Gusev

### Summary

This paper deals with evaluation of the upper mantle longitudinal wave velocities beneath Eastern Kamchatka with the help of the method of apparent velocities. It is stated that the longitudinal wave velocities within this region are ranging from 7.0 km/sec to 8.0 km/sec, the average velocity being 7.6 km/sec. Bands are stretching along Kamchatka. Maximum velocities are observed in the Sredinny Region and in the Kronotsk bay. Average velocities are characteristic of the Kamchatka river valley. Low velocities are usually confined to the volcanic regions.