

УДК 550.34

**ТРЕХМЕРНАЯ СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ В РАЙОНЕ
КАРЫМСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА
ПО ДАННЫМ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ**

Л. Б. Славина¹, Н. Б. Пивоварова¹, В. И. Левина²

¹Институт физики Земли РАН, г. Москва

*²Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский*

Аннотация. Работа посвящена построению скоростных моделей P- и S-волн в коре и верхней мантии района Карымского вулканического центра на Камчатке. Расчет проводился на основе сейсмологических данных региональной сети сейсмических станций по данным за 1996г. В январе 1996г. в этом районе наблюдались одновременно мощные вулканические и сейсмические события. Приведены результаты расчета скоростных моделей в вертикальной плоскости вдоль магмопроводящего разлома. Выявлены некоторые особенности динамики скоростных полей в пространстве и времени в период развития вулканического и сейсмического процессов.

**THREE-DIMENSIONAL VELOCITY MODEL IN THE REGION OF
KARYMSKY VOLCANIC CENTRE ON THE BASIS OF REGIONAL
SEISMICITY DATA**

L. B. Slavina¹, N. B. Pivovarova¹, B. I. Levina²

¹ Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow

*² Kamchatkan Experimental and Methodical Seismological Department, Geophysical Service, RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky*

Abstract. The study is devoted to construction of velocity models of P and S waves in the crust and upper mantle in the region of Karymsky volcanic centre in Kamchatka. The calculations were done on the basis of seismological data of the regional network of seismic stations in 1996. In January of 1996 large seismic and volcanoes events were observed in this region simultaneously. The results of calculations of velocity models in the vertical plane along the magma-conducting fault are presented. Some peculiarities of the dynamics of the velocity fields in space and time in the period of development of volcanic and seismic processes are discovered.

Введение

1 января 1996г. в районе Карымского вулканического центра, на суше произошло сильное ($M=7.0$) коровое, тектоническое землетрясение, сопровождавшееся многочисленными афтершоками. В этот же период в этом районе началось необычное вулканическое извержение. Вулканическая активность проявилась не только на самом вулкане Карымский, но также и на севере Карымского озера в кальдере Академии Наук,

которая образовалась 28-48 тыс. лет назад [1, 10]. Предыдущие извержения происходили в голоценовое время и приурочены были к тому же магмопроводящему разлому субмеридионального простирания, который проходит через вулканы Двор, Карымский, конус Лагерный, оз. Карымское, кальдера Академии Наук. По составу извержение 1996г. отвечает базальтам, т.е. это четвертый импульс подачи базальтового материала по тому же магмопроводящему разлому [1]. Все эти события сопровождались многочисленными слабыми землетрясениями на глубинах до 65 км. Сейсмическая активность в этом районе не затухала еще несколько месяцев [2].

Полученные Камчатской опытно-методической сейсмологической партией ГС РАН (КОМСП) уникальные сейсмические данные позволили авторам поставить и решить задачу определения скоростной модели среды по данным сейсмических P- и S- волн на различных этапах развития рассматриваемых сейсмических и вулканических процессов.

Описание исходных данных

В данной работе использованы сейсмологические данные, включающие параметры гипоцентров локальных землетрясений и времена пробега P- и S-волн до ряда региональных станций Камчатки. Обработка землетрясений производилась в Камчатской Опытно методической Сейсмологической Партии (КОМСП) Геофизической службы РАН на основании простой одномерной модели среды с учетом станционных поправок. Каталог составлялся по данным сетей радиотелеметрических станций КОМСП. Пара-метры гипоцентров определялись по программе Ю.Ю. Мельникова [5]. Время в очаге рассчитывается по графику Вадати, но не устанавливался его фиксированный наклон. Для каждого землетрясения рассчитывались граничные значения V_p/V_s , т.е. коридор значений. Для расстояний 0 – 500 км и глубин 0 – 200 км использовался годограф И.П.Кузина [4].

Большое количество зарегистрированных местных землетрясений позволило, в ходе исследования, рассмотреть данные трех временных интервалов:

- 1 января 1996г.- после 22 часов местного времени, т. е. после землетрясения с $M=7.0$;
- 2 января 1996г. - начало извержения в кальдере Академии Наук;
- период 3 января – 20 февраля 1996г. – продолжение извержения вулкана Карымский, продолжавшееся длительное время.

В расчете использовались данные 5-8 ближайших сейсмостанций, к сожалению, данные самой близкой станции KRY не могли быть использованы в начале исследуемого периода. Поэтому скорость в верхнем слое коры определялась менее уверенно. На рис. 1. приведены схема изучаемого района, указаны ближайшие сейсмостанции.

При расчете скорости изучаемая область составляла приблизительно прямоугольник в горизонтальной плоскости с размерами: 30×50 км, количество лучей станция-очаг, попадающих в отдельный временной интервал составляло 700-1200 штук.

Краткая информация о методике расчета

Авторами была разработана оригинальная методика восстановления полей скоростей сейсмических волн в зонах концентрации очагов землетрясений по сейсмологическим данным [6], которая применялась для оценки скоростного поля продольных волн в отдельных сейсмоактивных районах [8]. В последние годы эта методика была модифицирована, что позволило снять ряд критических замечаний и улучшить качество получаемых скоростных полей [7].

В основу рассматриваемой методики расчета скорости продольных и поперечных волн в трехмерной среде положен принцип взаимности волновых полей. Использование этого принципа позволяет рассматривать множество времен первых вступлений сейсмической волны от достаточно слабых землетрясений на некоторой сейсмической

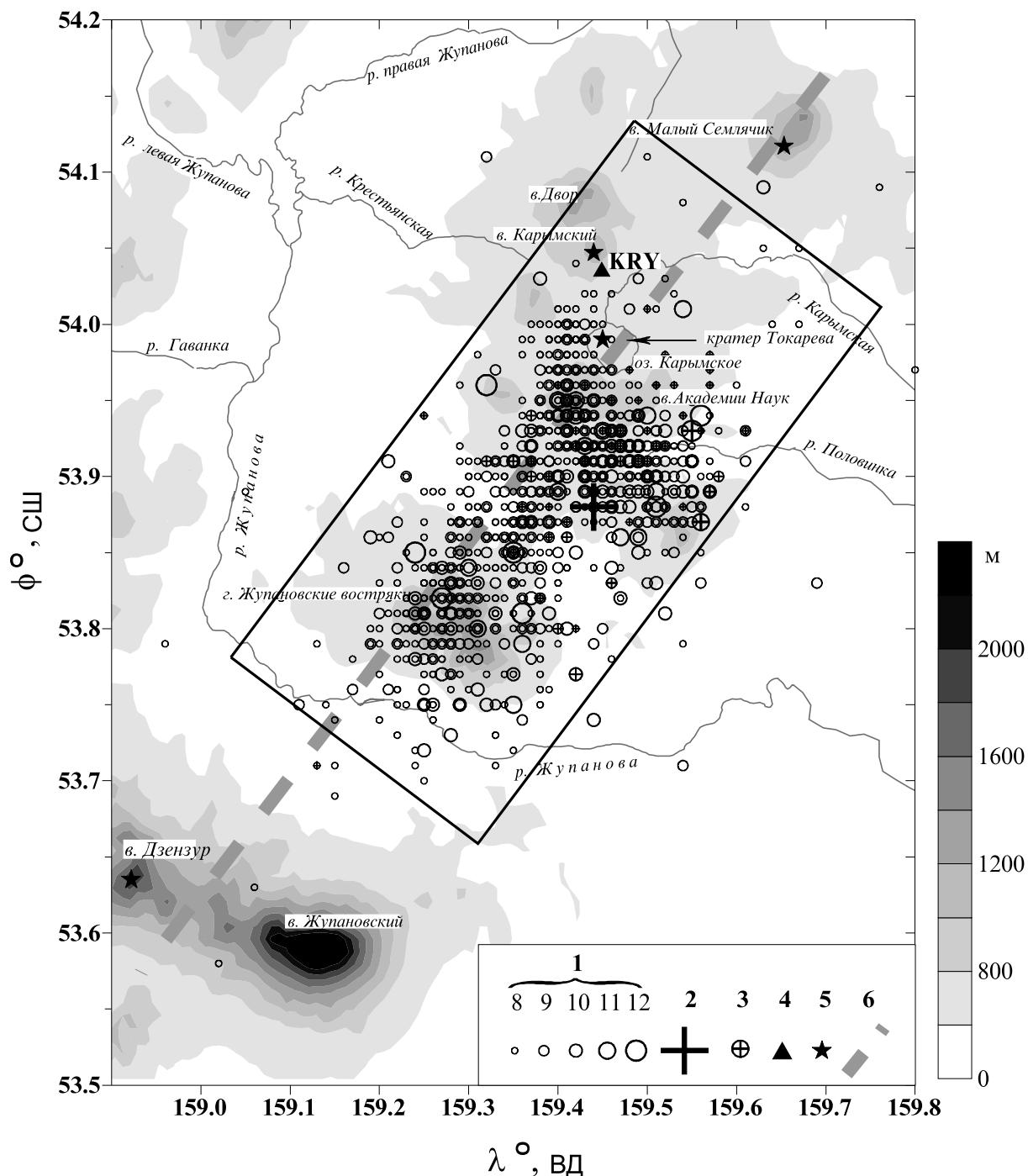


Рис. 1. Схема расположения области исследования. Карта эпицентров землетрясений Карымского вулканического центра в 1996 г. ($K_s \geq 8$).

1 – энергетический класс K_s (по С.А. Федотову); 2 – эпицентр Карымского землетрясения 1 января в 9^h57^m45.8^s (MS=7.0); 3 – эпицентры форшоковых землетрясений; 4 – сейсмическая станция Карымская; 5 – действующие вулканы; 6 – глубинный магмоподводящий разлом.

Fig. 1. The scheme of location of the investigated area.

The map of the epicentres of Karymsky volcanic centre in 1996 ($KS \geq 8$). 1 – energetic class KS (by S.A. Fedotov); 2 – epicentre of Karymsky earthquake on January 1, 1996, at 9h57m45.8s (MS=7.0); 3 – epicentres of foreshock earthquakes; 4 – seismic station Karymsky; 5 – active volcanoes; 6 – deep magma-supplying fault.

станции как времена пробега обратной волны от этой сейсмической станции до различных точек трехмерного пространства. Алгоритм позволяет рассчитывать положение фронта сейсмической волны и скорость его перемещения, если заданы времена пробега P- или S-волн от серии очагов, расположенных в некоторой фиксированной области, до конкретной станции.

При построении фронта в области G используются простые поверхности, аппроксимирующие форму фронта, например плоскость или сфера. Для случая аппроксимации фронта волны плоскостью времена первых вступлений можно записать в виде:

$$t_{ij} = t_{0j} + A_j(x_i - x_{0j}) + B_j(y_i - y_{0j}) + C_j(z_i - z_{0j})$$

Задача определения скорости, т.е. коэффициентов A_j , B_j , C_j сводится к решению несовместной системы уравнений

$$t_{0j} + A_j(x_i - x_{0j}) + B_j(y_i - y_{0j}) + C_j(z_i - z_{0j}) = t_{ij}, \quad i=1, \dots n$$

Это типичная некорректная задача, которая может быть решена с помощью введения стабилизирующего функционала. При этом в задаче появляется параметр регуляризации \pm , выбор которого должен быть обоснован с помощью дополнительных модельных расчетов. Более полно особенности методики изложены в работах [6-8].

Отметим, что хорошее заполнение рассматриваемой области очагами землетрясений дает возможность исследовать различие скоростей распространения сейсмических продольных волн в различных направлениях. Возможно, при хорошем наборе данных удастся выявить анизотропию скоростей распространения сейсмических волн. Для этого следует рассмотреть поля скоростей, усредняя скорости в точке только для станций с близких направлений.

Рассматриваемая методика является дифференциальной, в алгоритме используются только разности экспериментальных времен от двух очагов из области G . Размеры области G выбираются достаточно малыми по сравнению с расстоянием до станции, чтобы можно было считать, что волны из близких точек M_0 и M_i вне области G проходят приблизительно одинаковый путь. Тем самым исключается влияние особенностей строения коры под станцией, наличие систематической ошибки во временах и координатах очагов.

Большое значение для качества результатов расчета имеет равномерное заполнение области усреднения очагами землетрясений. Для рассматриваемого региона было проведено специальное исследование точности восстановления скорости, в котором расположение точек было реальным, а времена пробега рассчитывались в трехслойной среде с введением случайных ошибок. Результаты расчетов приведены в работе [7].

Расчеты были проведены независимо по данным P- и S-волн, это возможно, так как при определении времени в очаге не фиксировался угол наклона графика Вадати.

В ходе расчетов была введена локальная декартовая система координат. Направление оси OY параллельно направлению магмопроводящего разлома. Полученные значения скоростей в отдельных точках, расположенных хаотично в трехмерной области, приходится сглаживать для построения изолиний. В работе [9] приведены карты – срезы полей скоростей P- и S-волн, построенные в горизонтальных плоскостях. В данной работе приводятся результаты усреднения поля скоростей в вертикальных плоскостях в направлении Юго-Запад – Северо-Восток ($X=\text{const}$). При этом при построении изолиний участвовали точки с координатами ± 10 км от выбранной плоскости сечения. На всех рисунках слева расположена южная часть сечения, справа – северная.

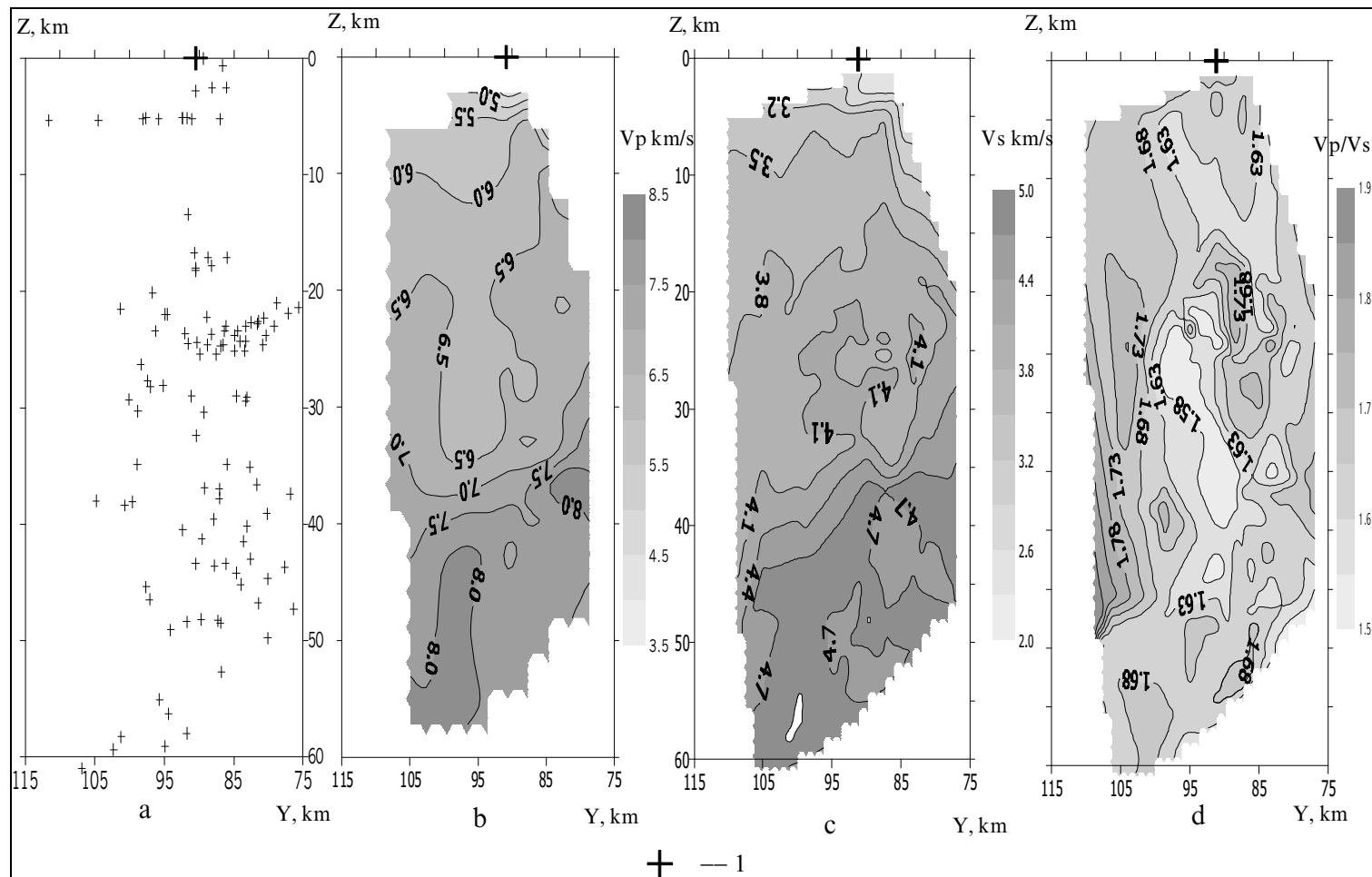


Рис. 2. Вертикальные сечения юго-запад – северо-восток по данным 1 января 1996 г.:
а – распределение точек, в которых была определена скорость; б – скоростное поле V_p ; в – скоростное поле V_s ; г – отношение V_p/V_s . 1 – Эпицентр 01.01.96 $M=7.0$, 2 – кальдера АН.

Fig. 2. Vertical sections south-west – north-east by the data of January 1, 1996:

a – distribution of the points were the velocity was determined; b – velocity field V_p ; c – velocity field V_s ; d – field of the relation V_p/V_s ; 1 – epicenter 01.01.96 $M = 7.0$, 2 – caldera RAN.

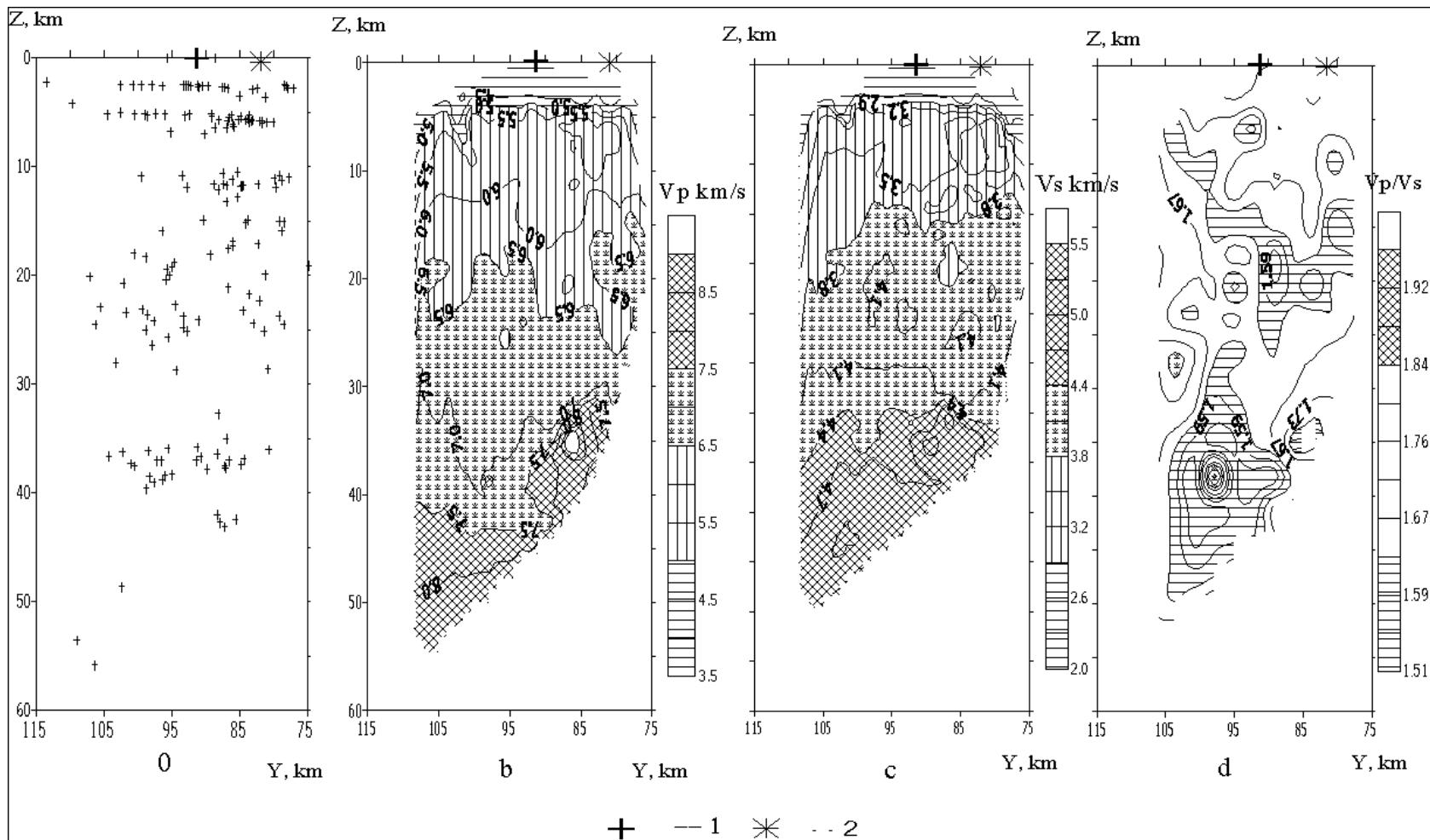


Рис. 3. Вертикальные сечения юго-запад – северо-восток по данным 2 января 1996 г.:

а – распределение точек, в которых была определена скорость; б – скоростное поле V_p ; в – скоростное поле V_s ; д – отношение V_p/V_s . 1 – Эпицентр 01.01.96 $M=7.0$, 2 – кальдера АН.

Fig. 3. Vertical sections south-west – north-east by the data of January 2, 1996:

a – distribution of the points were the velocity was determined; b – velocity field V_p ; c – velocity field V_s ; d – field of the relation V_p/V_s .

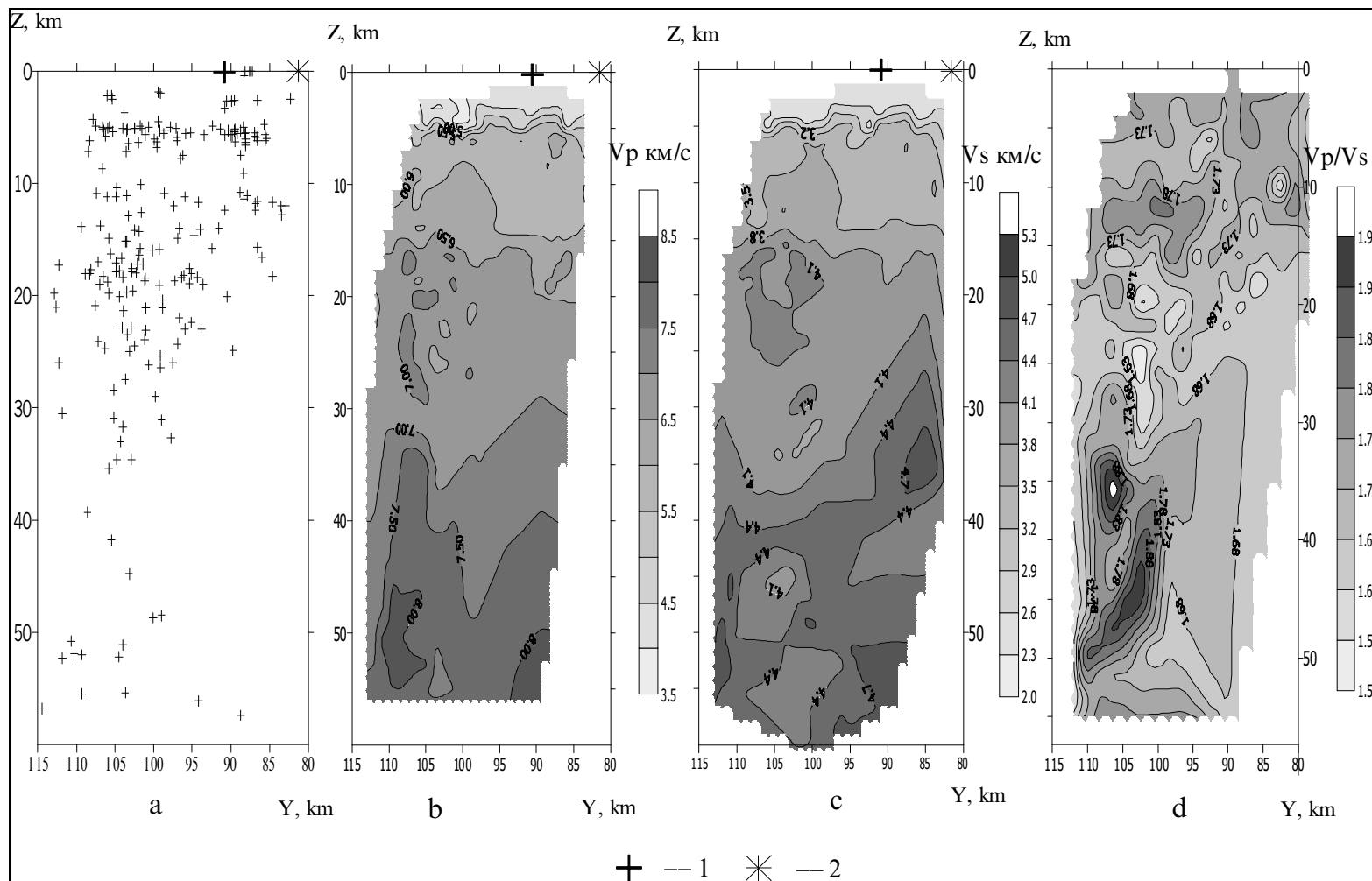


Рис. 4. Вертикальные сечения юго-запад – северо-восток по данным 3 января – 20 февраля 1996 г.:

а – распределение точек, в которых была определена скорость; б – скоростное поле V_p ; в – скоростное поле V_s ; д – отношение V_p/V_s . 1 – Эпицентр 01.01.96 $M=7.0$, 2 – кальдера АН.

Fig. 4. Vertical sections south-west – north-east by the data of January 3 – February 20, 1996:

a – distribution of the points where the velocity was determined; b – velocity field V_p ; c – velocity field V_s ; d – field of the relation V_p/V_s .

Результаты расчета полей скоростей

На рисунках 2-4 приведены результаты расчета для трех временных интервалов. На каждом рисунке даны: распределение очагов, в которых была рассчитана скорость, изолинии скоростей Р- и S-волн и отношение V_p/V_s . Последняя величина V_p/V_s вначале рассчитывалась для каждой точки, а потом сглаживалась и строились ее изолинии.

На всех рисунках видно, что заполнение точек выбранной плоскости неравномерно, поэтому изолинии не были построены там, где нет исходных данных. Кроме того, заметно, что в целом изменчивость полей Р-волн более выраженная, чем полей S-волн.

Несинхронная изменяемость Р- и S-волн приводит к заметному изменению отношения V_p/V_s в области, где были рассчитаны скорости.

Сравнивая поля изолиний по данным 1 января (рис. 2) и 2 января (рис. 3), можно отметить, что в обоих случаях на картах Р-волн заметно опускание (понижение) изолинии $V_p=6.5$ км/с до глубины 35 км (1 января) и до глубины 25 км (2 января). При этом это опускание изолинии располагается 1 января под гипоцентром главного толчка, а 2 января область понижения скорости сдвинулась на север в сторону кальдеры Академии наук. На рис. 4 такое понижение изолинии $V_p=6.5$ км/с практически исчезло. Подобное поведение скоростей Р- и S-волн на глубинах 10 - 25 км отразилось на карте V_p/V_s аномально низкими значениями величины V_p/V_s .

На всех трех рисунках заметен подъем изолиний высоких значений скоростей, равных $V_p \geq 7.5$ км/с. Причем, изолинии скорости испытывают подъем в направлении с юга на север. Так изолиния скорости $V_p=7.5$ км/с поднимается до 35 км 1 и 2 января. Похожая ситуация наблюдается и на поле изолиний $V_s=4.34$ км/с, поэтому в поле V_p/V_s в области больших глубин аномалий нет. Однако, на рис. 4 по данным 3 января – 20 февраля, на глубине около 40 км видна область аномально высоких значений V_p/V_s , что обусловлено более низкими скоростями S-волн в этой области.

В итоге, можно наблюдать значительное увеличение градиента скоростей Р-волн на глубинах 25 – 45 км.

Заключение

Сейсмологические данные региональной сети Камчатки, полученные и обработанные КОМСП ГС РАН, являются хорошей основой для построения скоростных моделей Р- и S-волн. Применение метода обращенной волны для обработки сейсмологических данных слабых компактно расположенных землетрясений позволило получить локальные скоростные модели, проследить за динамикой их изменения во времени и пространстве.

По данным расчетов можно сделать вывод, что во время протекающих вулканических процессов, происходит изменение скоростного поля сейсмических волн, появляются области повышенных градиентов скоростей.

Полученные вертикальные, одномерные скоростные разрезы $V_p(z)$ и $V_s(z)$ могут быть использованы в сейсмической службе для уточнения параметров гипоцентров землетрясений в районе Карымского вулканического центра.

Список литературы

1. Брайцева О.А. Фреатомагматическое извержение в озере Карымское (восточная Камчатка) 6500¹⁴ С лет назад и импульсы подачи базальтового вещества в районе Карымского вулкана в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. с.138 -144.
2. Гордеев Е.И., Дроздин Д.В., Касахара М., Левина В.И. и др. Сейсмические явления, связанные с извержением вулканов в Карымском вулканическом центре в 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. с. 28-48.

3. Гусев А.А. Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. с. 74-81.
4. Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М. Наука, 1994. 132 с.
5. Мельников Ю.Ю. Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. 1990. № 5. с. 103-112.
6. Пивоварова Н.Б., Славина Л.Б. Методика расчета и исследование устойчивости трехмерных полей скоростей продольных волн (на примере Камчатки) // Физика Земли. 1981. № 12, с 19-27.
7. Пивоварова Н.Б, Пивоваров В.Г. Методические аспекты алгоритма восстановления трехмерной скоростной среды // Электронный журнал «Вестник отделения наук о Земле». 2003. № 1(21).
8. Славина Л.Б., Гарагаш И.А., Горельчик В.И. и др. Скоростное строение и напряженно-деформированное состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2001. № 1. с. 49-59.
9. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Левина В.И. Скоростное строение в районе Карымского вулканического центра на Камчатке // Электронный журнал «Вестник отделения наук о Земле». 2003. № 1(21).
10. Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и Сейсмология. 1997. № 5. с. 3-37.
11. Hole. J.A. at al. Three-dimensional P and S wave structure of Redoubt Volcano, Alaska. J. Geophys. Res., 1996, v. 101, p. 8111-8128.
12. Slavina L.B., Pivovarova N.B. Three – dimensional velocity models of focal zones and refinement of hypocenter parameters // Phys. of the Earth and Planet. Inter., 1992, v. 75, p. 77-88.