

УДК 550.34

УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ В РАЙОНЕ ВУЛКАНОВ БОЛЬШАЯ И МАЛАЯ УДИНА (КЛЮЧЕВСКАЯ ГРУППА ВУЛКАНОВ, КАМЧАТКА) ПО ДАННЫМ О ЛОКАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Бурмин В.Ю.¹, Кугаенко Ю.А.²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН г. Москва, burmin@ifz.ru

² Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский

Для уточнения скоростного строения среды под Удинскими вулканами использованы авторские подходы к определению координат гипоцентров землетрясений и обращению годографов от глубинных источников. Значения скоростей распространения сейсмических волн получены по данным о землетрясениях Удинской сейсмической активизации 2017-2019 гг. Разработка локальной скоростной модели направлена на повышение точности определения координат гипоцентров в районе Удинского вулканического комплекса.

Введение. Базовая скоростная модель Ключевской группы вулканов

Ключевская группа вулканов (КГВ) включает как действующие (Ключевской, Безымянный, Ушковский, Плоский Толбачик, поле ареального вулканизма Толбачинский Дол), так и потухшие вулканы (Большую и Малую Удину, Овальную и Острую Зимину, Крестовский, Средний, Острый Толбачик, Горный Зуб). Действующие вулканы, в отличие от потухших, проявляют сейсмическую активность на глубине до ~30–35 км, усиление которой может предшествовать извержению. В 2017–2019 гг. в юго-восточной части КГВ появился новый сейсмогенерирующий объем, проявивший себя впервые за годы инструментальных наблюдений. Пространственно он связан с Удинской группой потухших вулканов и рассматривается как Удинская сейсмическая активизация [10]. Для детального исследования этой активизации и уточнения положения гипоцентров землетрясений необходимо построение локальной скоростной модели.

Даже в пределах единой КГВ вулканы исследованы далеко неравномерно. Удинский вулканический комплекс, включающий два стратовулкана (Большую и Малую Удину) и несколько голоценовых экструзивных куполов, можно рассматривать как ее наименее исследованный участок. Это относится как к геологическим данным, так и к представлениям о внутреннем строении земной коры. В основной монографии, посвященной Удинским вулканам [13], данные о глубинном строении ограничиваются описанием геологии фундамента.

Основные инструментальные исследования, направленные на получение скоростных характеристик среды под КГВ, – это глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ) в начале 70-ых гг. XX века, захватившее центральную и северную части КГВ, и сейсмическое просвечивание методами ГСЗ и преломленных волн в районе новообразованных Толбачинских вулканов в южной части КГВ (1975–1977 гг.) [1–3]. Оба исследования не были ориентированы на область Удинских вулканов. Однако предполагалось, что КГВ является единой вулканической системой, и поэтому было составлено общее представление о строении ее литосферного блока, которое было распространено на всю территорию группы. В верхней части разреза было выделено несколько сейсмических границ со скоростями от 1.8 до 4 км/с (верхняя вулканогенно-осадочная толща, мощность до 4 км). Граница со скоростями 4.0–4.4 км/с отнесена к кровле неогеновых отложений, ее глубина варьирует от 0.2 до 2 км. Кровле верхнемелового-палеогенового фундамента на глубине от 3 до 5 км поставлена в соответствие граница со скоростями 4.8–5.3 км/с. Хорошо выражена граница кристаллического фундамента (скорость 6.0–6.2 км/с), отождествляемая с кровлей консолидированной коры на глубине 5–8 км. Граница Конрада К находится под КГВ на глубине 15–20 км, причем выражена по данным ГСЗ нечетко. Поверхность Мохо М не имеет определенного пространственного положения в виде единой границы раздела: на глубинах от 28–32 км до 40–42 км получена группа границ, объединяемых в «переходный слой» от коры к мантии. Граничные и пластовые скорости этой зоны под КГВ составляют 7.6–7.8 км/с. Например, под Толбачинскими вулканами М располагается на глубине ~35 км. По результатам ГСЗ [1] была принята базовая модель земной коры КГВ до глубины 40 км [7, 12]: $h < 2$ км, $V_p=2.2$ км/с, $V_p/V_s=2.0$; $h=2-4$ км, $V_p=4.6$ км/с, $V_p/V_s=1.8$; $h=4-8$ км, $V_p=5.3$ км/с, $V_p/V_s=1.8$; $h=8-20$ км, $V_p=6.2$ км/с, $V_p/V_s=1.73$; $h=20-30$ км, $V_p=6.8$ км/с, $V_p/V_s=1.73$; $h=30-40$ км, $V_p=7.7$ км/с, $V_p/V_s=1.73$; $h = 40$ км, $V_p=8.0$ км/с, $V_p/V_s=1.73$, где h – глубина от уровня моря, (модель А на рис. 1).

В дальнейшем скоростная модель была уточнена [11], различные варианты функции $Vp(h)$ приведены на рис. 1. Однако она осталась единой для всей КГВ. Удинская сейсмическая активизация (компактно расположенный кластер землетрясений) дает возможность построить локальную скоростную модель, используя подходы, изложенные в [4–6].

В данной работе представлены результаты первого этапа разработки такой скоростной модели. Выполнен расчет гипоцентров по [5], определено оптимальное значение Vp/Vs для исследуемого района, построена локальная скоростная функции $Vp(h)$ путем обращения географов P -волн, распространяющихся вверх от гипоцентра.

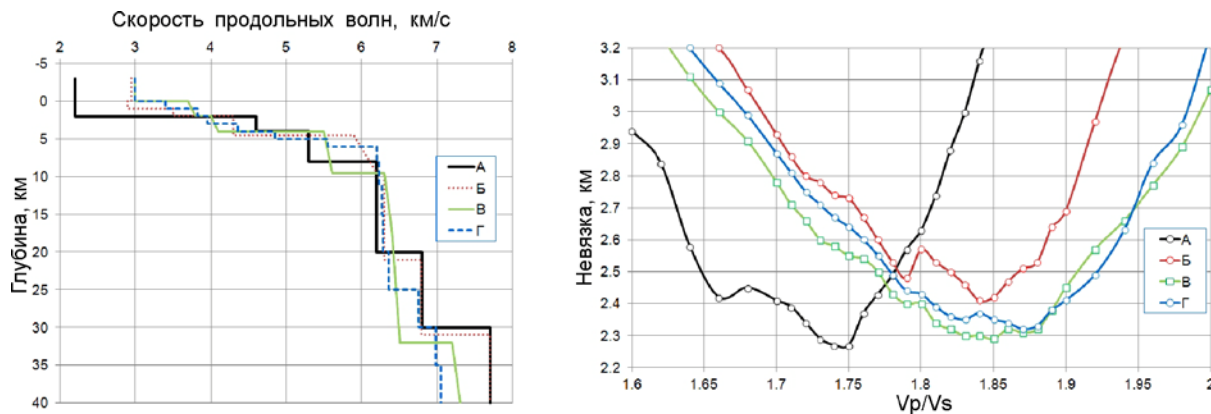


Рис. 1. Скоростные модели среды под Ключевской группой вулканов, обозначения моделей соответствуют [11] (слева). Графики, иллюстрирующие зависимость суммарной невязки при расчете гипоцентров землетрясений от выбранного отношения Vp/Vs для каждой из четырех моделей (справа). Модель A – базовая модель по результатам ГСЗ.

Исходные данные

Информационная основа исследований – результаты обработки землетрясений Удинской активизации в Камчатском информационно-обрабатывающем центре¹. Использованы времена вступления P и S -волн. С октября 2017 г. по июнь 2019 г. под Удинскими вулканами локализовано ~2.5 тыс. сейсмических событий с $ML \sim 1–4.3$ в диапазоне глубин преимущественно до 20–25 км. Согласно камчатскому каталогу землетрясений активизацией охвачена территория ~20×20 км.

Дополнительно привлекались данные временной сети сейсмических станций, организованной вокруг Удинских вулканов в мае–июле 2018 г. [14]. Апертура сети ~10 км. В работе [14] показано, что по данным временных станций размеры активизации уменьшаются, меняется ее конфигурация, а гипоцентры удинских землетрясений смещаются под вулкан Большая Удина. Нами использовались данные о ~60 землетрясениях, которые произошли в пределах границ сейсмической группы в период ее работы.

Метод исследования

Определение гипоцентров землетрясений. Задача определения координат гипоцентров в районе вулканов Большая и Малая Удина решалась как задача минимизации функционала

$$S = \sum_{i=1}^n (D_i - d_i)^2 + (H - h)^2, \quad (1)$$

где D_i и H соответствуют теоретическим временам t_i пробега сейсмических волн от очага до i -й станции; D_i – эпицентральные расстояния; H – глубина очага землетрясения, которые определяются из решения системы нелинейных уравнений,

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + H^2 = v^2 (t_i - t_0)^2, \quad (2)$$

а d_i и h – те же величины, но соответствующие истинному положению гипоцентра [5].

Величины h задаются на одномерной сетке Δh в интервале $[0, h_m]$, а h_m вычисляется из условия

¹, Единая информационная система сейсмологических данных Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, <http://sdis.emsd.ru/main.php>

$\tau_{\min} = \int_0^{h_m} \frac{dz}{v(z)}$, где τ_{\min} – время пробега сейсмической волны до ближайшей от очага сейсмической

станции. Для каждого h определяются величины d_i путём решения прямой кинематической задачи сейсмологии из условия близости теоретических времен t_i пробега сейсмических волн (определённых, например, по графику Вадати) наблюдаемым временам \tilde{t}_i .

Определение скорости распространения сейсмических волн. Скорость распространения продольных сейсмических волн определялась путем обращения годографов от глубинных источников (землетрясений) [6]. Ставится задача определения функции $H(u)$ и, следовательно, глубины источника и минимальное и максимальное значения скорости в слое над источником. Напомним, что функция $H(u)$: а) не убывает; б) равна нулю при $-\infty < u \leq u^* = u(z^*)$; в) равна $h=z^*$ при $u(0) = u_0 \leq u < \infty$. Здесь u^* и u_0 – соответственно минимальное и максимальное значения функции $u(z)=v^{-1}(z)$ в слое над источником.

В качестве решения задачи рассматривается решение в смысле наименьших квадратов, минимизирующее функционал

$$J(H, x) = \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{p} \left\{ x(p) - p \int_{p_2}^{u_{\max}} \frac{dH(u)}{\sqrt{u^2 - p^2}} \right\}^2 dp, \quad (3)$$

$$\text{при условии} \quad dH(u) \geq 0, \quad (4)$$

где $p_1 = t'(x_{\min})$ и $p_2 = t'(x_{\max})$ – пределы внешнего интегрирования; $[x_{\min}, x_{\max}]$ – интервал на котором прослеживаются экспериментальные годографы.

Проделив соответствующие вычисления, получим, что функция, реализующая минимум функционала $J(H, x)$ является решением уравнения [6]

$$f(w) = \int_{p_2}^{u_{\max}} \ln \frac{\sqrt{w^2 - p_1^2} + \sqrt{u^2 - p_1^2}}{\sqrt{w^2 - p_2^2} + \sqrt{u^2 - p_2^2}} dH(u), \quad (5)$$

где $f(w) = x_{\max} \arcsin \frac{p_2}{w} - x_{\min} \arcsin \frac{p_1}{w} - \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \arcsin \frac{t'(x)}{w} dx$.

Из уравнения (5) следует, что в классе монотонных функций скоростная кривая над источником и глубина источника определяются по любому конечному фрагменту годографа.

Для численного решения уравнения (5) следует перейти к его дискретизации, разбив сегмент $[p_2, u_{\max}]$ на N частичных сегментов $[u_{j-1}, u_j]$. На сегменте $[p_2, u_{\max}]$ рассматривается функция скачков ΔH_j ($j=1, 2, \dots, N-1$). В этом случае имеет место система N линейных уравнений относительно N неизвестных ΔH_j :

$$f(w_i) = \sum_{j=1}^N d_{ij} \Delta H_j, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где $d_{ij} = \ln \frac{\sqrt{w_i^2 - p_1^2} + \sqrt{u_j^2 - p_1^2}}{\sqrt{w_i^2 - p_2^2} + \sqrt{u_j^2 - p_2^2}}$ положительно определенная матрица и $\Delta H_j \geq 0$. (7)

Очевидно, решение системы (5), которая может быть записана в виде $A^T \Delta H = A^T x$, минимизирует функционал $R = \|\Delta H - x\|^2$.

Таким образом, задача сводится к задаче квадратичного программирования в конечномерном пространстве, которая всегда имеет единственное решение (при условии не вырожденности матрицы $D=A^T A$ системы (6)), так как выпуклый по ΔH функционал R ограничен снизу и непрерывен на выпуклом множестве $\eta = \{\Delta H_j | \Delta H_j \geq 0\}$ [8].

Решая задачу (6), (7) одним из известных методов, например, методом сопряженных градиентов [9], найдем значения неизвестных величин ΔH_j . Функция $H(u)$ на сегменте $[p_2, u_{\max}]$ определяется из соотношений $H(u) = H_j + \Delta H_j$; $u \in [u_j, u_{j+1}]$; $\Delta H_j \geq 0$; $j=1, 2, \dots, N-1$; $H_1 = H^*(u) = 0$.

Одна из проблем при интерпретации экспериментальных годографов от глубинных источников – определение точки перегиба годографа. Однако эта задача решается в процессе определения координат гипоцентров по углам выхода лучей из гипоцентра.

Параметры p , равные производной годографа, определяются как производные выпуклого кубического сплайна, аппроксимирующего точки экспериментального годографа [4].

Построение скоростной функции

Определение функции $V_p(h)$ в районе вулканов Большая Удина и Малая Удина проводилось в несколько этапов. На начальном этапе из четырёх опубликованных в [11] скоростных колонок путём перебора была выбрана та, которая давала минимум значения функционала (1). При этом с шагом 0.1 одновременно перебирались значения отношения V_p/V_s . В качестве входных данных использовались результаты регистрации удинских землетрясений компактной временной сетью (май–июль 2018 г.), чтобы исключить влияние латеральных коровых неоднородностей. В результате анализа результатов расчетов для дальнейшей работы была выбрана скоростная модель B из [11], а наилучшим значением отношения скоростей на этом этапе было признано $V_p/V_s = 1.85$.

Следующим этапом было обращение годографов продольных волн, распространяющихся вверх от гипоцентра. Был привлечен основной массив данных о землетрясениях Удинской активизации (~2.5 тыс. событий). Гипоцентры получены в результате описанной выше процедуры расчетов.

На первом шаге был построен годограф от событий на глубине ~5–6 километров, для которых значение функционала (1) было меньше единицы, а сами события были зарегистрированы не менее чем четырьмя станциями. На рис. 2 приведены годограф, представленный выпуклым кубическим сплайном и аппроксимирующий экспериментальные точки, и скоростная кривая, полученная по этому годографу. Полученные значения скоростей до глубин 6 км были подставлены в исходную скоростную колонку и проведено переопределение гипоцентров «удинских» землетрясений. Аналогичная процедура была проделана еще трижды с построением годографов для глубин 10 км, 20 км и 30 км (рис. 2). Существенным в приведённой процедуре переопределения координат гипоцентров «удинских» землетрясений является то, что на каждом шаге значение функционала (1) становилось меньше предыдущего значения.

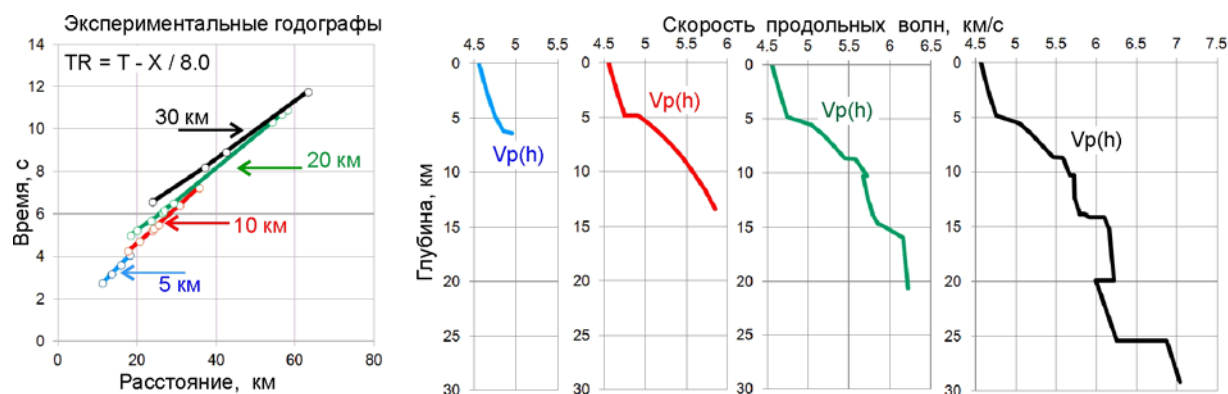


Рис. 2. Экспериментальные годографы для указанной глубины гипоцентра землетрясений (слева) и соответствующие им скоростные кривые (справа).

Обсуждение результата и заключение

В результате получено распределение скорости с глубиной $V_p(h)^*$ для района потухших вулканов Большая и Малая Удина (рис. 3). Колонка $V_p(h)^*$ представляет собой набор слоев, в которых скорость продольных волн меняется линейно. При этом отношение V_p/V_s на этом этапе принято постоянным для глубины до 40 км и равным $V_p/V_s = 1.85$. Скачки скорости соответствуют глубинам 15 км и 25 км. В диапазоне глубин 20–25 км, возможно, удалось выявить волновод.

В этой работе мы не рассматриваем диапазон глубин выше уровня моря и в постройке вулкана. Для этих глубин опубликованные данные о скоростях распространения сейсмических волн сильно разнятся, и этот вопрос требует отдельного изучения.

На рис. 3 для сравнения с $V_p(h)^*$, полученной в данной работе, приведена скоростная модель, принятая по результатам ГСЗ [1, 2]. Видно, что характер изменения скорости с глубиной под Удинскими вулканами заметно отличается от обобщенной базовой кривой, полученной для северной части КГВ. Наибольшие отличия в скоростях наблюдаются в верхней коре (на глубине до 4 км). В модели $V_p(h)^*$ скорость продольных волн почти в 2 раза превышает величины для вулканогенно-осадочного чехла, приведенные в [2]. Возможно, эта толща в юго-западном секторе КГВ развита относительно скудно, а полученные для верхних горизонтов коры скорости ($V_p \sim 4.5$ – 4.6 км/с) свидетельствуют о

близповерхностном залегании кровли неогеновых отложений. На больших глубинах кривая $V_p(h)^*$ лежит ниже базовой скоростной кривой. На глубине 20 км, которая может соответствовать границе Конрада, скачок скорости в двух сравниваемых моделях имеет противоположные знаки: увеличение скорости по результатам ГСЗ и ее уменьшение по нашим данным.

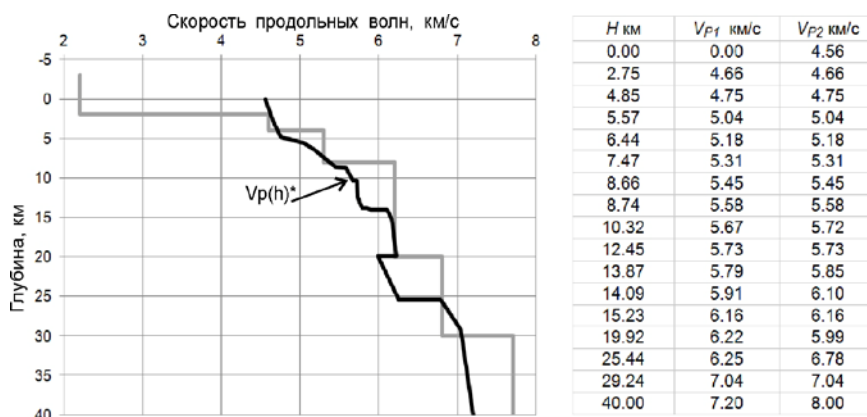


Рис. 3. Скоростная модель $V_p(h)^*$ для района Удинских вулканов, полученная в данной работе. Для сравнения приведена скоростная кривая, принятая для КГВ по результатам ГСЗ (серая линия). H – глубина от уровня моря. V_{P1} и V_{P2} – скорости поперечных волн на глубине H , сверху и снизу соответственно.

В данной работе впервые предпринята попытка построить $V_p(h)$ для ограниченного сегмента КГВ, охваченного сейсмической активизацией на уровне средней–верхней коры. Полученные значительные различия в локальной и обобщенной моделях распределения скорости с глубиной, а также высокое значение $V_p/V_s = 1.85$ могут быть связаны с особенностями систем магматического питания и вулканической активности в разных частях КГВ. Первые результаты, подтверждающие возможность присутствия в коре под Удинскими вулканами объемов, содержащих некоторое количество магмы, представлены в [14].

Исследования выполнены в рамках Госзадания ИФЗ РАН и ФИЦ ЕГС РАН при поддержке научного проекта РФФИ № 19-05-00204.

Список литературы

1. Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А., Сергеев К.Ф., Утнасин В.К., Федорченко В.И. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 130 с.
2. Балеста С.Т. Земная кора и магматические очаги современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 134 с.
3. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975-1976 гг., Камчатка). М.: Наука, 1984. 637 с.
4. Бурмин В.Ю. Аппроксимация сейсмического годографа выпуклыми сплайнами // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1980. № 2. С. 90-96.
5. Бурмин В.Ю. Новый подход к определению параметров гипоцентров близких землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 73-82.
6. Бурмин В.Ю. Обращение годографа сейсмической волны, распространяющейся от глубинного источника // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 62-71.
7. Горельчик В.И., Степанов В.В. Сейсмичность Северной группы вулканов Камчатки в 1971-1972 гг. // Глубинное строение, сейсмичность, и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. С. 108-118.
8. Карманов В.Г. Математическое программирование. М.: Наука. 1975. 272с.
9. Никашева М.М. Алгоритм решения задачи квадратичного программирования методом сопряженных градиентов. М.: ВЦ МГУ. 1968. 11 с.
10. Салтыков В.А., Воробаев П.В., Кугаенко Ю.А., Чебров Д.В. Удинская сейсмическая активизация 2017-2018 гг. // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 1. Вып. 37. С. 5-7.
11. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000-2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68-78.
12. Сургучев П.И., Горельчик В.И., Левина В.И., Мячкин В.В. Массовое определение гипоцентров землетрясений на ЭВМ в районе Северной группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 50-63.
13. Тимербаева К.М. Петрология Ключевских вулканов на Камчатке. М.: Наука, 1967. 208 с.
14. Koulakov I., Komzeleva V., Abkadyrov I., Kugaenko Yu., Khrepy S., Al Arifi N. Unrest of the Udina volcano in Kamchatka inferred from the analysis of seismicity and seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. V. 379. P. 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.015>.