

## ДИНАМИКА ПОЛЯ ОТНОШЕНИЯ СКОРОСТЕЙ $V_P/V_S$ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ И ЕЕ СВЯЗЬ С ПРОЦЕССОМ РАЗВИТИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

Славина Л.Б.<sup>1</sup>, Кучай М.С.<sup>1</sup>, Сеньюков С.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли РАН, г. Москва, [slavina@ifz.ru](mailto:slavina@ifz.ru)

<sup>2</sup>Камчатский филиал Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба Российской академии наук" (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск-Камчатский

Динамика вулканической активности, накопления и перемещения магм, строение корней вулканов и магматическая питающая система являются основными проблемами, стоящими при исследовании вулканов. Северная группа вулканов (СГВ) является наиболее мощной действующей группой, расположенной на севере Камчатки и включает такие действующие вулканы как Ключевской, Крестовский, Ушковский, Безымянный и Плоский Толбачик. На севере к этой группе относится также вулкан Шивелуч. Исследования строения Ключевской группы проводились различными геофизическими методами, включая методы ГСЗ [1]. Были получены основные границы в коре и мантии [2]. Однако ни один из указанных выше методов в силу методических особенностей не позволял проследить за изменением скоростей во времени по глубине, и связь этих изменений с процессом вулканической активизации. Это позволил сделать метод «обращенной волны», разработанный Славиной, Пивоваровой. Методика позволила восстановить скорости в области концентрации очагов вулканических землетрясений и проследить за изменением их во времени и по глубине [5, 6, 7].

Землетрясения в вулканически активной области несут информацию о пути перемещения магм, состоянии вещества геологической среды, отражают пространственно-временные изменения среды, ее напряженно-деформированное состояние. Сейсмическая активность на уровне слабых региональных землетрясений несет информацию об активизации того или иного участка вулканической области, о подготовке извержения. При слежении за временами пробега  $P$ - и  $S$ -волн, регистрируемых на станциях, и отношением скоростей этих волн, параметром  $V_P/V_S$  она также несет информацию о тектоническом строении среды, выявляя подчас предполагаемые геологами погребенные, разрывные структуры, пути перемещения магм.

### Введение

В данной работе представлены результаты расчетов отношения скоростей  $V_P/V_S$  в области Ключевской группы вулканов по данным вулканических землетрясений, зарегистрированных сетью телеметрических станций, расположенных в районе исследуемых вулканов. Расчеты проводились по данным, полученным в результате обработки параметров слабых вулканических землетрясений [3], зарегистрированных в КФ ГС РАН в период с 2009 г. по 2017 г. В расчетах участвовали все зарегистрированные в районе СГВ землетрясения с энергетического класса  $3 \leq K_S \leq 7.5$ . Землетрясения из фокальной зоны в расчетах не участвовали.

Значения  $V_P/V_S$  рассчитывались по формуле

$$V_P/V_S = T_{S-P} / (T_P - T_0) + 1,$$

где  $T_{S-P}$  – разность времен вступлений  $P$ - и  $S$ -волн на конкретной станции от  $i$ -ого землетрясения,  $(T_P - T_0)$  – время пробега  $P$ -волны. Методика расчета параметра  $V_P/V_S$  разработана ранее.

Отношение скоростей так же может быть выражено через упругие параметры Ламе:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}}.$$

Здесь  $\lambda$  — первый, а  $\mu$  — модуль сдвига ( $\text{H}/\text{m}^2$ ) – соответственно, второй, параметры Ламе, коэффициенты закона Гука выражающего в линейной теории упругости зависимость между тензором деформации  $\varepsilon$  и тензором напряжений  $\sigma$  в упругой среде:

$$\sigma = 2\mu\varepsilon + \lambda\text{Tr}(\varepsilon)I$$

В свою очередь, параметры Ламе через модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  выражаются следующим образом:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Отметим, что когда значения упругих параметров  $\mu$ ,  $\lambda$  равны,  $V_P/V_S$  равно корню из 3, т.е. 1.73. Приведенные выше формулы, соотношения, связывающие упругие параметры однозначно свидетельствуют о прямой связи параметра  $V_P/V_S$  с полем напряжения и состоянием среды в вулканически активном регионе. Значения равные  $1.73 \pm 0.05$  считались нормальными для исследуемой геологической среды. Значения  $V_P/V_S < 1.68$  считались пониженными, значения  $> 1.78$  – повышенными.

На исследуемой территории развитая и оснащенная цифровой телеметрической аппаратурой сеть сейсмических станций, обеспечивающая наблюдения и проведение анализа в режиме близком к реальному времени за изменениями времен пробега сейсмических  $P$  и  $S$  волн их отношения  $t_S/t_P$ , параметром  $V_P/V_S$ , которые фиксируют и отражают изменения вулканической активности, напряженного состояния геологической среды. Важным преимуществом имеющихся сейсмологических данных является не только наличие каталогов слабых землетрясений за длительный период времени, но и времена пробега  $P$  и  $S$  волн от региональных землетрясений до близкорасположенных к вулканам сейсмических станций региона.

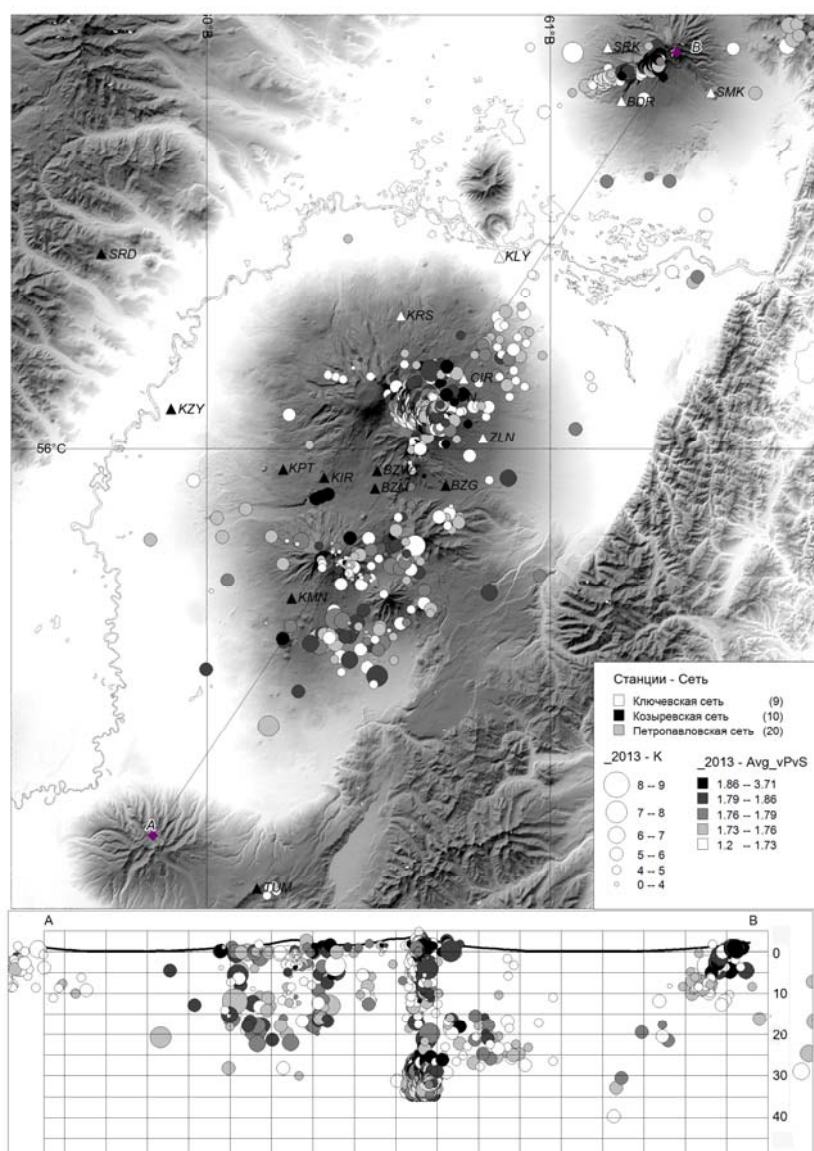


Рис. 1. Исследуемый район Северной группы вулканов Камчатки.

### Описание результатов расчетов поля $V_P/V_S$

Расчеты параметра  $V_P/V_S$  производились по указанной выше формуле. Осреднение параметра для каждого события осуществлялось по станциям, где значение  $S-P$  не превышало 5 сек.

Были использованы данные за 2009–2017 гг. В расчетах были использованы более 5000 землетрясений, энергетического уровня  $K_S \geq 1.5 - 7.5$  [3, 4]. На рис. 1, в качестве примера, показан район исследования: вулканы, сейсмические станции и землетрясения, произошедшие в районе СГВ в 2013 г. Размер кружочка эпицентра соответствует энергетическому классу  $K_S$ , окраска – величине  $V_P/V_S$  в соответствии с условными обозначениями.

На приведенной карте и разрезе по глубине вдоль линии АВ хорошо видны особенности распределения землетрясений, присущие Северной группе. Четко выделяется подводящий магматический канал под Ключевским вулканом, периферический очаг на границе коры и мантии. На глубине 25–35 км подводящий, наклонный канал под Шивелучем, активность подводящего канала под Плоским Толбачиком. В 2013 г. продолжалось его трещинное извержение, начавшееся 27 ноября 2012 г.

Землетрясения выбирались внутри «стаканов», в центре которых был соответствующий вулкан. Радиусы окружности (проекция стаканов осреднения на поверхность), были выбраны в зависимости от вулкана, от 30 км до 15 км. Были построены временные разрезы по глубине для вулканов Ключевской, Шивелуч и Плоский Толбачик за период с 2009 г. по 2017 г. Окраска окружности-эпицентра соответствует среднему значению  $V_p/V_s$  в соответствии с приведенной шкалой на разрезах по времени и глубине (а) и по глубине по профилю АВ (б) внутри стакана, вокруг Ключевского вулкана (рис. 2). На разрезах приведенных ниже по Ключевскому вулкану можно видеть, что повышенные значения характерны в основном для постройки вулкана. Причем, в период активности вулкана в 2009 и в 2013 г. повышенные значения опускаются в область промежуточного очага до глубин 8–10 км. Так называемая область нейтральной плавучести, на глубинах 10–20(25) км, характеризуется смешанными слабо повышенными и нормальными, незначительно пониженными значениями. Особый интерес вызывают значительно пониженные значения. Они группируются как в области периферического очага на глубине 30–35 км, так и в области промежуточного очага в некоторые интервалы времени.

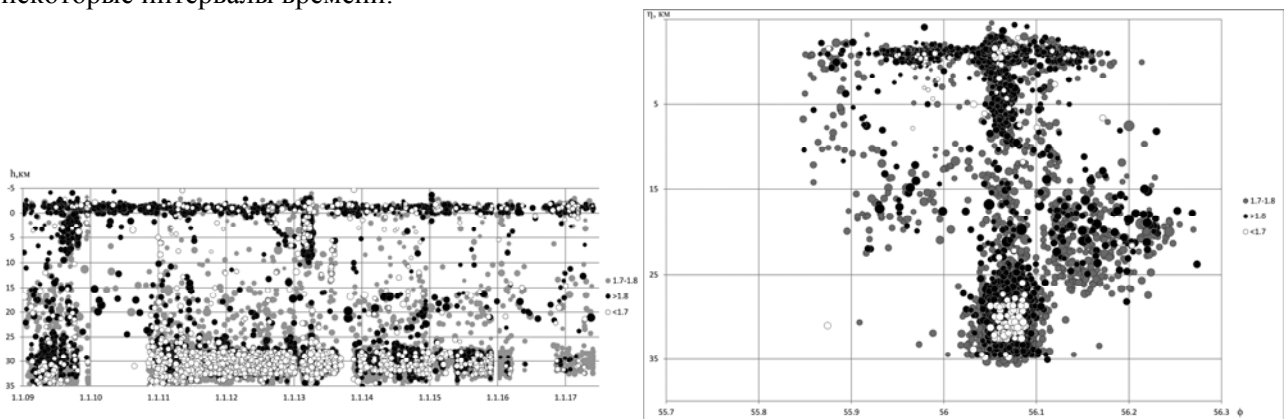


Рис. 2. Диаграмма глубина-время (а) и меридиональный разрез (б) области вокруг Ключевского вулкана за период 2009–2017 гг.

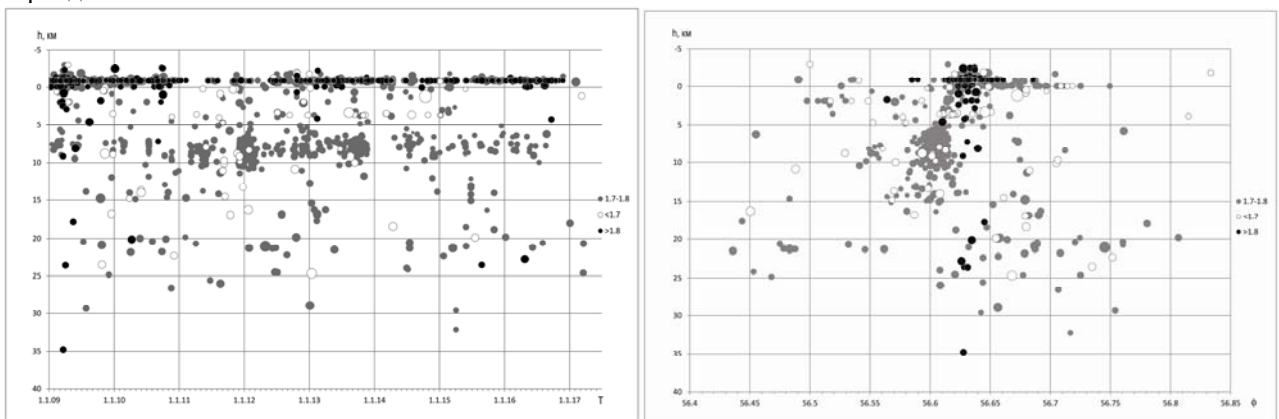


Рис. 3. Диаграмма глубина-время (а) и меридиональный разрез (б) области вокруг вулкана Шивелуч за период 2009–2017 гг.

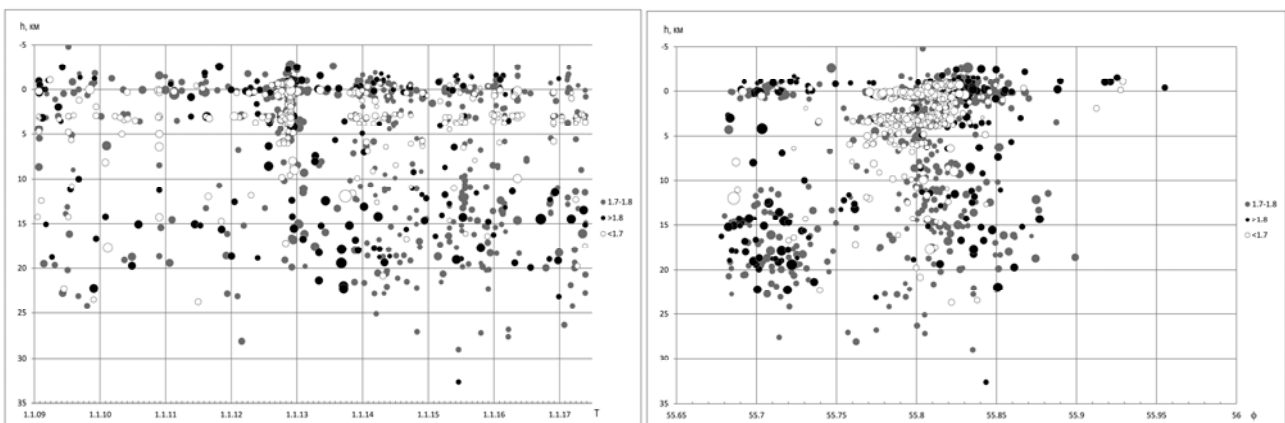


Рис. 4. Диаграмма глубина-время (а) и меридиональный разрез (б) области вокруг вулкана Пл. Толбачик за период 2009–2017 гг.

На разрезах, построенных в области осреднения вулкана Шивелуч можно видеть, что в постройке вулкана наблюдаются повышенные значения  $V_p/V_s$ . В период 2012 г. повышенные значения регистрируются до глубин 5 км. На глубинах 5–10 км мы видим нормальные значения, близкие к значению 1.73.

Особый интерес вызывает разрез по глубине вдоль линии АВ. (рис. 3б). Подводящий канал имеет наклон на ЮЗ, прослеживается до глубин 15 км. В постройке вулкана и до глубины 5–6 км наблюдаются значительно пониженные значения  $V_p/V_s$  до значений 1.60.

На этих глубинах, вероятно, располагается промежуточный очаг.

На разрезе в области осреднения в районе Плоского Толбачика можно видеть в период Трещинного извержения 2012–2013 гг. пониженные значения в районе промежуточного очага, на глубинах 4–6 км. Питающий канал наблюдается до глубин 15–20 км. Значения  $V_p/V_s$  на глубинах ниже 6 км в среднем близки к нормальным. Юго-восточнее Плоского Толбачика, в Толудской зоне, повышенные значения наблюдаются на глубине 15–20 км.

### Оценки распределений параметра $V_p/V_s$ в исследуемой области

На графиках распределения значений параметра показаны кривые нормированных значений для указанных вулканов. Можно видеть, что максимум средних значений для трех вулканов отличаются. Для Шивелуча это повышенное значение, равное 2.1, причем кривая сдвинута в область повышенных значений. Для Ключевского максимум в окрестности 1.8. Для Плоского Толбачика максимум также в районе 1.8, но при этом кривая сдвинута в область низких значений  $V_p/V_s$  (рис. 5).

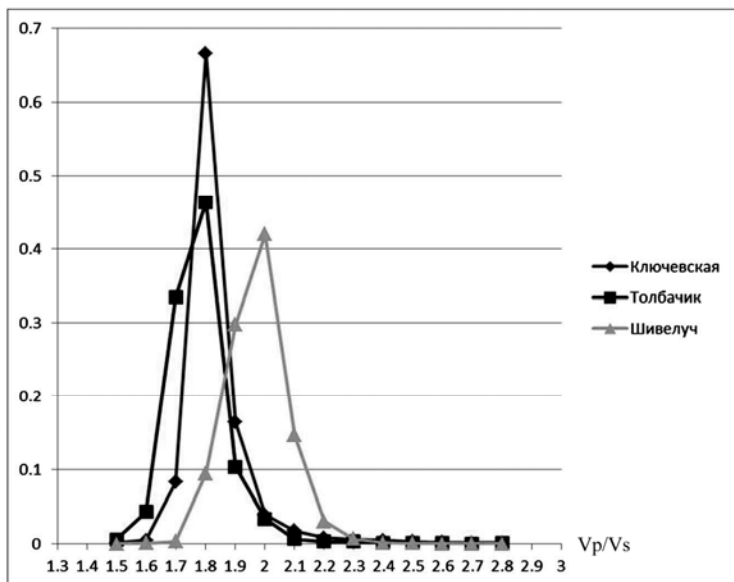


Рис. 5. Нормированные графики распределения параметра  $V_p/V_s$  для трех вулканов – Ключевского, Шивелуча, Плоского Толбачика.

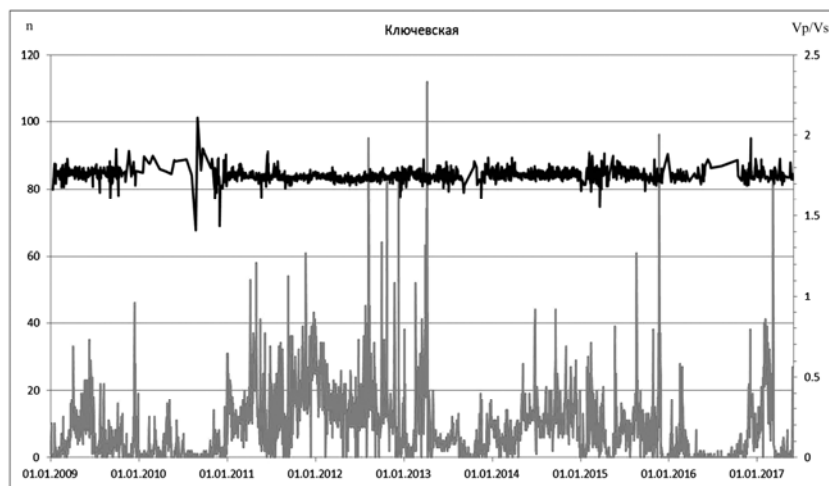


Рис. 6. Графики изменения  $V_p/V_s$  и суточного числа землетрясений зарегистрированных в окрестности Ключевского вулкана.

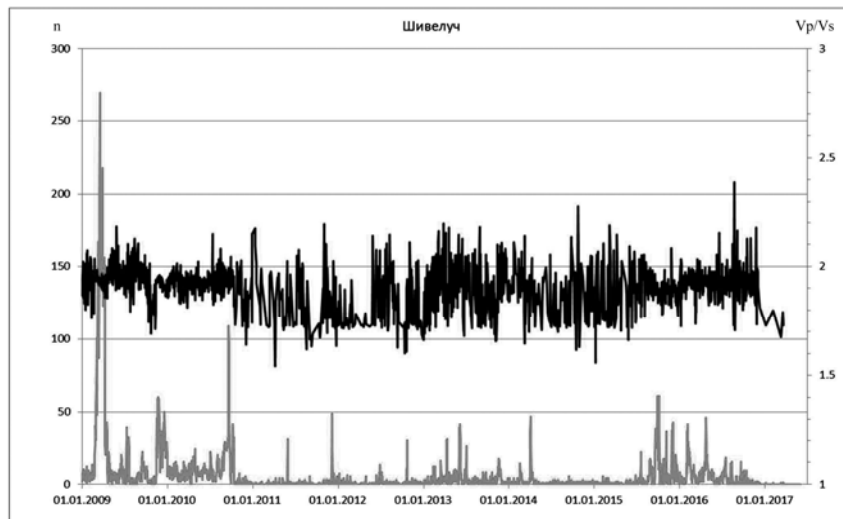


Рис. 7. Графики изменения  $V_p/V_s$  и суточного числа землетрясений зарегистрированных в окрестности вулкана Шивелуч

На графиках иллюстрирующих зависимость  $V_p/V_s$  от активности вулканов (рис. 6, 7, 8), можно видеть, что после очередного пика активности вулкана среднее значение  $V_p/V_s$  несколько меняется. Особенно хорошо это заметно на рис. 7 (Шивелуч), но имеет место и для других вулканов.

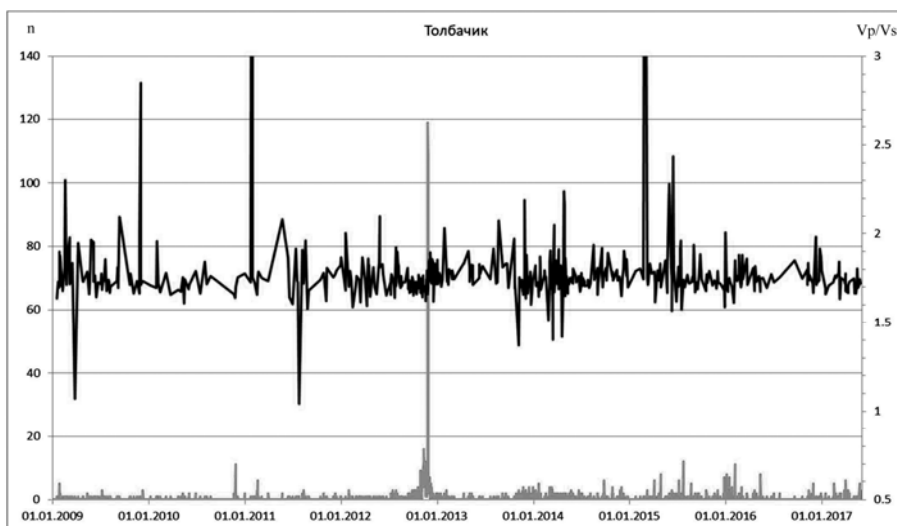


Рис. 8. Графики изменения  $V_p/V_s$  и суточного числа землетрясений зарегистрированных в окрестности вулкана Плоский Толбачик.

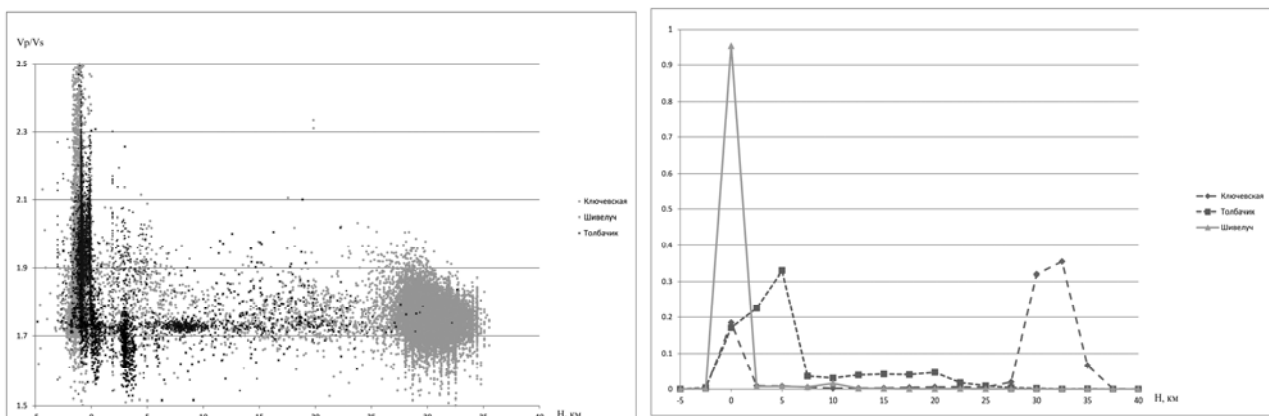


Рис. 9. Распределения значений параметра  $V_p/V_s$  по глубине. Точечная диаграмма (а) и нормированные значения (б).

На точечном распределении единичных значений параметра от глубины для трех вулканов можно видеть, что для Ключевского вулкана и вулкана Шивелуч характерны повышенные значения  $V_p/V_s$  достигающие значений 2.3 и выше в постройке вулканов, на глубинах -3–0 км. В области периферического очага, на глубинах 25–35 км для Ключевского вулкана можно видеть как повышенные значения до уровня 1.9, так и понижены до уровня 1.5. Вероятно, значения зависят от поступления коромантийной магматической смеси и состояния вещества в процессе перемещения магмы в канале. Интерес вызывают значения для вулкана Плоский Толбачик. Пониженные значения наблюдаются как в постройке вулкана, так и в области промежуточного очага на глубинах 3–5 км, где величины опускаются до значений 1.5–1.6. В области слоев нейтральной плавучести на границе гранитного и базальтового слоев на глубинах 10–20(25) км можно видеть увеличение дисперсии, разброс значений параметра вокруг нормального значения  $V_p/V_s$   $1.73 \pm 0.05$ .

На графиках числа событий на разных глубинах можно видеть, что максимум для вулкана Шивелуч на глубине 0 км, т.е. постройка вулкана. Для Ключевского максимум на глубинах 30–35 км, т.е. в области периферического очага на границе коры и мантии. Для Плоского Толбачика – 0–5 км, т.е. в области промежуточного очага по Федотову [8].

### Обсуждение результатов

По полю параметра  $V_p/V_s$  можно проследить за изменением вулканического процесса в пространстве и времени. Поле, в какой-то степени отражает состояние магматического процесса, вероятно, так же и вещественный состав магматического вещества, а также изменения поля напряжений в различные периоды развития вулканической активности. Формирование в поле параметра  $V_p/V_s$  градиентных зон (границ аномалий повышенных и пониженных значений), по аналогии с результатами, полученными в период подготовки сильных землетрясений, могут предвещать и свидетельствовать о подготовке вулканических извержений. Аномалии параметра также, свидетельствуют о состоянии вещества в этих областях.

Низкие значения  $V_p/V_s$ , наблюдающиеся в области промежуточных магматических очагов, под Ключевским вулканом на глубинах 8–10 км, и на глубинах 4–5 км под Плоским Толбачиком, вероятно, свидетельствуют о состоянии вещества в этих областях, и могут быть связаны с магматическими расплавами и флюидно-газовой составляющей.

Следует констатировать, что параметр не остается постоянным ни во времени, ни в пространстве в периоды развития процесса вулканической активности. Для различных периодов характерно свое поведение поля.

### Список литературы

1. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А.А., Пак Г., Пушкарев В.Г., Сеньюков С.Л. Результаты сейсмических исследований земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3–18.
2. Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сеньюков С.Л. Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и Сейсмология. 2004. № 3. С. 3–11.
3. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
4. Сеньюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 96–108.
5. Славина Л.Б., Гарагаи И.А., Горельчик В.И., Иванов Б.В., Белянкин Г.А. Скоростное строение и напряженно-деформированное состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2001. № 1. С. 49–59.
6. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Левина В.И. Трехмерная скоростная модель среды в районе Карымского вулканического центра по данным региональной сейсмичности // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 377–386.
7. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Сеньюков С.Л. Скоростное строение коры и верхней мантии в районе северной группы вулканов Камчатки (по данным времен пробега  $P$ - волн от вулканических землетрясений) // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 3. С. 38–50.
8. Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.