

УДК 550.347

ОТРАЖЕНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И СОСТОЯНИЯ МАГМАТИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В КИНЕМАТИЧЕСКОМ ПАРАМЕТРЕ V_p/V_s ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РАЙОНА ВУЛКАНОВ ТОЛБАЧИК – УДИНА

Кучай М.С., Славина Л.Б.

Институт физики Земли РАН, г. Москва, slavina@ifz.ru

Представлены результаты исследования поля отношения скоростей сейсмических Р и S волн – параметра V_p/V_s – в южном сегменте Северной группы вулканов Камчатки (СГВ), в районе вулканов Плоский Толбачик, Большая и Малая Удины, группы вулканов Зимины, Толудской зоны шлаковых конусов по данным вулканических землетрясений, зарегистрированных сетью телеметрических сейсмических станций КФ ГС РАН. С октября 2017 г. в районе вулканов Б. и М. Удины СГВ наблюдается беспрецедентная сейсмическая активность, свидетельствующая о пробуждении Удинских вулканов, не проявлявших себя весь исторический период наблюдений.

Отношение скоростей Р и S волн, V_p/V_s связано с упругими параметрами среды и так же может быть выражено через параметры Ламе μ , λ . В теории упругости закон Гука выражает линейную зависимость между тензором деформации ϵ и тензором напряжений σ в упругой среде:

$$\sigma = 2\mu\epsilon + \lambda \text{Tr}(\epsilon)I, \quad (1)$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} \quad (2)$$

Когда упругие параметры Ламе μ , λ в формуле (2) равны, V_p/V_s равно корню из 3, т.е. ~ 1.73 . Значения равные 1.73 ± 0.05 считались нормальными для исследуемой геологической среды, значения $V_p/V_s < 1.68$ – считались пониженными, $V_p/V_s > 1.78$ – считались повышенными.

Единичные значения параметра рассчитываются аналитически по формуле:

$$V_p/V_s = T_{s-p}/(T_p - T_0) + 1,$$

где T_{s-p} – разность времен вступлений Р- и S-волн на конкретной станции от i -ого землетрясения, $T_p - T_0$ – время пробега Р-волны. Затем для каждого события рассчитывались осредненные по группе станций значения параметра V_p/V_s . Полученное значение приписывалось положению гипоцентра.

Исследовано распределение параметра V_p/V_s по площади, глубине и изменения во времени в южном сегменте СГВ, в период с октября 2017 г. по настоящее время. Проведено сравнение поведения параметра в районе вулканов Б. и М. Удины в периоды трещинных извержений Плоского Толбачика – БТТИ 1975–1976 гг., ТТИ 2012–2013 гг.

Характер распределения параметра V_p/V_s в области сейсмической активизации, за период времени 01.10.2017–23.07.2019 показан на карте и разрезах. Можно видеть, что активизация развивается весьма интенсивно в направлении на ЮВ, от П. Толбачика в сторону Удины, причем значения параметра V_p/V_s в основном пониженные. Повышенные значения концентрируются в основном в Толудской зоне шлаковых конусов, и в постройке вулкана Безымянный. Заметим, что в этот период вулкан был активен. Разрезы построены в трех направлениях: близ широтный – П. Толбачик – Б. и М. Удины (AB); по долготе, по направлению – Б. и М. Удины – Зимины – Безымянный (CD); Толуд – Удины – Зимины – Безымянный (EF) (рис. 1)

На разрезах можно видеть пониженные значения параметра V_p/V_s , концентрирующиеся в виде слоя, на глубине 3–5 км. Повышенные значения наблюдаются в постройке вулкана Безымянного и выше нулевой отметки глубины в постройке Б. Удины. Активность наблюдается как в районе вулканов Удины, так и южнее в Толудской зоне шлаковых конусов. Причем, если под Б. Удиной мы наблюдаем концентрацию пониженных значений параметра в верхней части разреза, на глубинах 3–5 (7) км, а глубже, до глубин 15 км в основном повышенные значения, то в «вулканических структурах» Толудской зоны, южнее Удины, мы видим многочисленные «вулканические очаги» с пониженными значениями до глубин 10 км. В этих же структурах землетрясения с повышенными значениями параметра достигают глубин 20 км (рис. 1, EF).

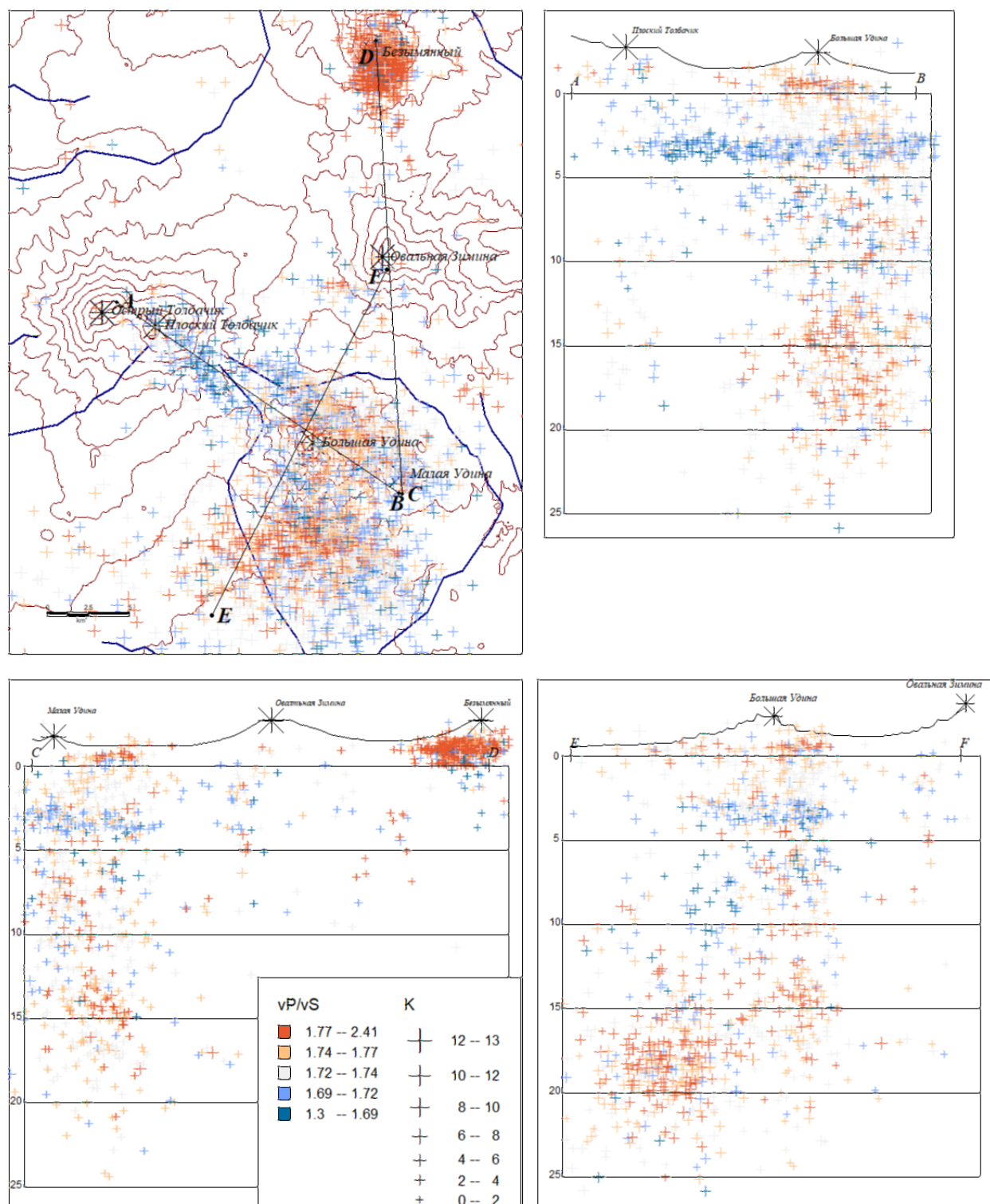


Рис. 1. Гипоцентры вулканических землетрясений с окраской по значению параметра V_p/V_s в южном сегменте Северной группы вулканов в период с 1.10.2017 по настоящее время [7]. Карта и профили по линиям AB, CD и EF соответственно

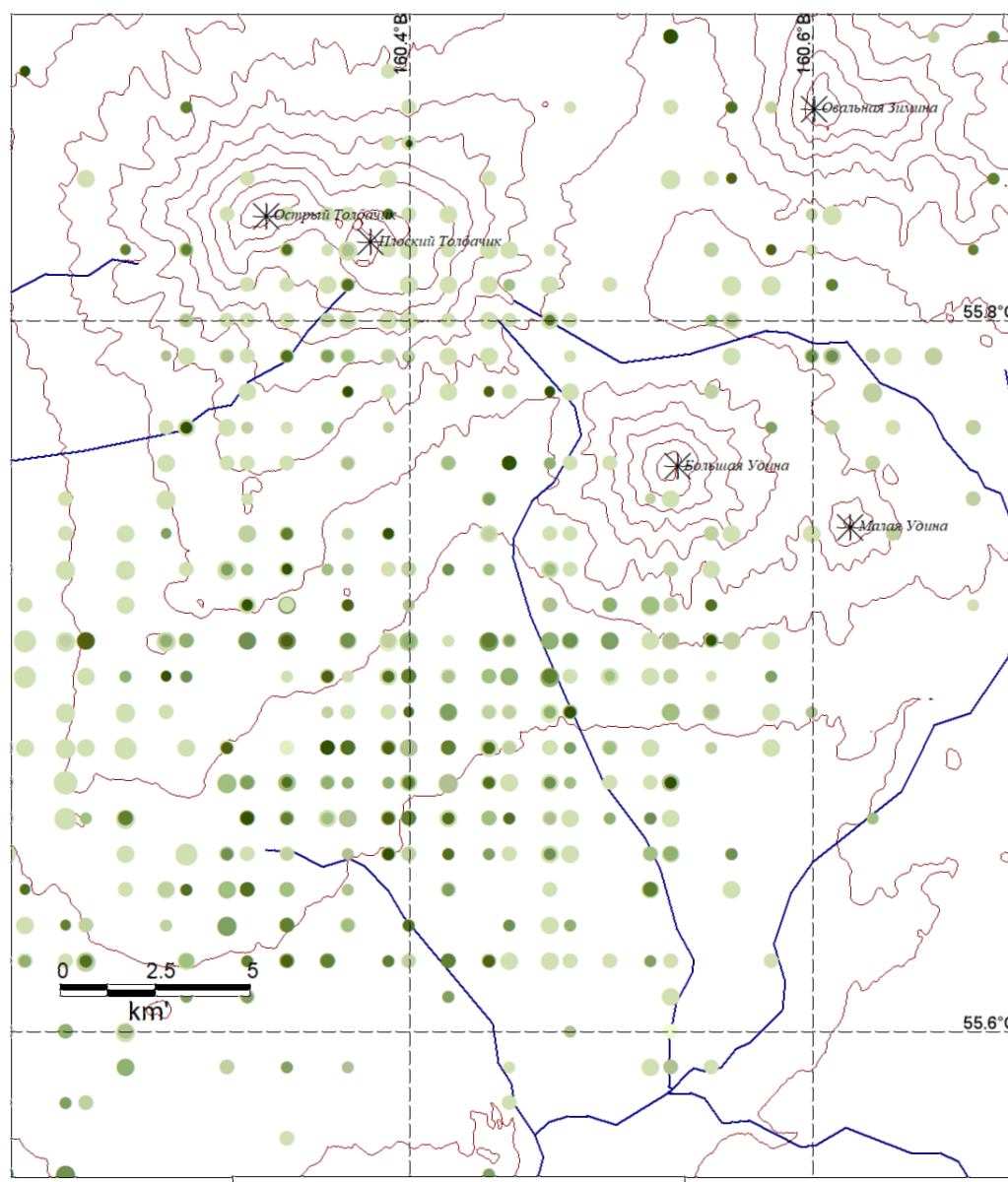


Рис 2. Карта размещения эпицентров вулканических землетрясений в период БТТИ 1974–1976 гг. по [8]

По гипоцентрам землетрясений можно видеть каналы подъема магматического вещества с нормальными значениями V_p/V_s из очаговых областей с глубин 15–20 км к слою на глубине 3–5 км, и каналы, ведущие от этого слоя в постройки вулканов. Землетрясения в постройках вулканов имеют в основном повышенные значения V_p/V_s .

Вероятно, областью питания указанных вулканов, являются периферические очаги, расположенные на глубине 15–20 км под вулканами группы, включая и Толудскую зону шлаковых конусов. Они характеризуются относительно повышенными значениями V_p/V_s . Рассмотрим вопрос о том наблюдалась ли активизация в области вулканов Б. Удины в предыдущие периоды, в том числе Трещинных извержений Плоского Толбачика – БТТИ 1975–1976 гг., ТТИ 2012–2013 гг. В период БТТИ активизация распространялась на юг, юго-запад, о чем свидетельствуют Северный и Южный прорывы БТТИ. (рис. 2)

В период ТТИ наблюдалось развитие активности в направлении Б. Удины, но Б. Удины оно не достигло (рис. 3). На карте и разрезе по широте, построенном через очаговую область П. Толбачика можно видеть концентрацию пониженных значений в том же слое на глубине 3–5 м, в котором мы фиксируем ее в настоящее время. По утверждению С.А. Федотова на этой глубине расположен промежуточный очаг П. Толбачика [12], что было также показано по параметру V_p/V_s в работе [11].

Однако, в настоящий период активизации в слое продолжают наблюдаться пониженные значения, со значительным продвижением на ЮВ, достигая, Б. Удины (рис.1.).

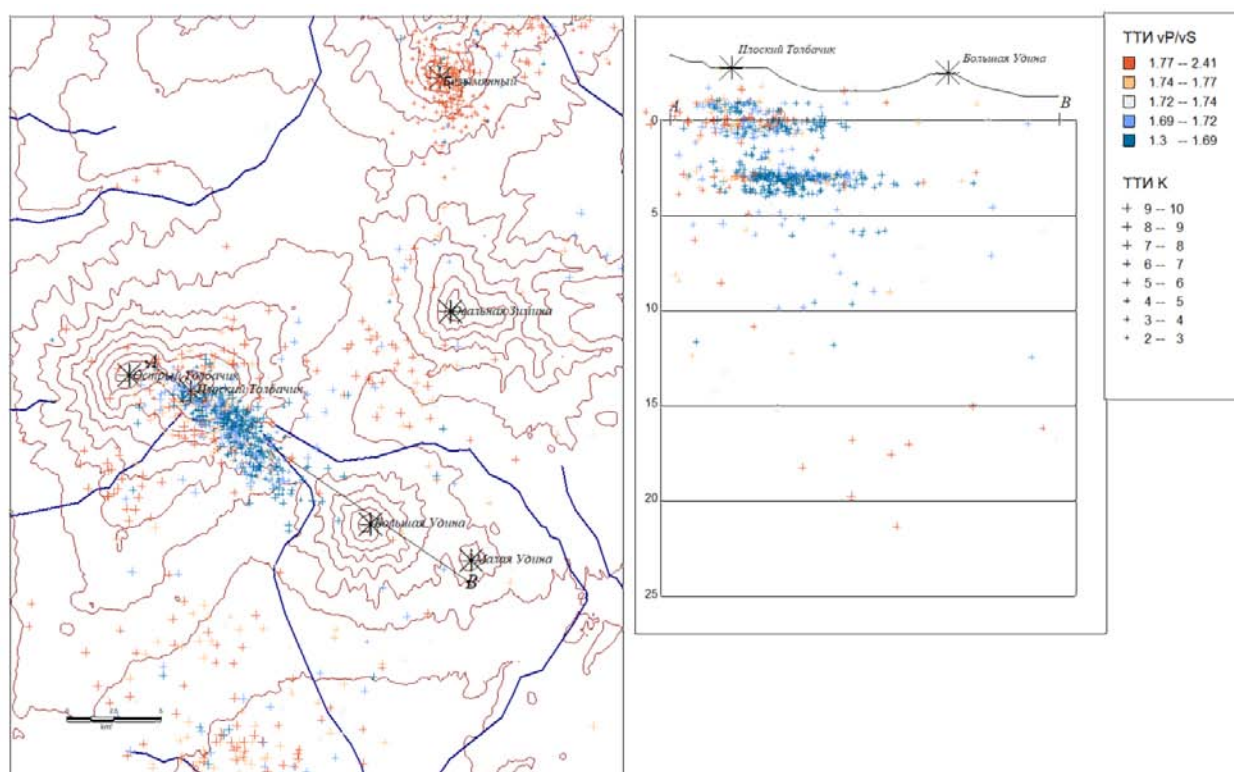


Рис. 3. Карта и разрез по профилю АВ, в период ТТИ 2012–2013 гг. Разрез пересекает вулканы П. Толбачик и Б. и М. Удины. Окраска гипоцентров в соответствии со значениями V_p/V_s

Интерес представляет факт различия средних значений величин параметра V_p/V_s между вулканами Ключевской, Безымянный, П. Толбачик, Б. и М. Удины и группой вулканов Зимины. Можно видеть, что значения V_p/V_s близки к нормальным у вулканов Ключевского, Зиминских сопки и Б. Удины. У Безымянного кривая растянута от значений 1.7 до повышенных 2.0. У П. Толбачика кривая сдвинута в сторону пониженных значений (рис. 4).

По утверждению вулканологов [5, 6], по составу магм эти вулканы различны. Отмечается, что среди вулканитов Ключевской группы по петрохимическим особенностям выделяются две серии пород. Первая – базальт-андезито-базальтовая (вулканы Толбачик, Плоские, Ключевская, Камень, ареальные образования). Вторая – базальт-дацитовая (вулканы Безымянный, Зимины, Большая и Малая Удины). Предполагается что процесс дифференциации при образовании магм в условиях мантия–поверхность и мантия–промежуточный очаг–поверхность различен и фиксируется средним составом петрохимических величин. Т.е. состав магм вулканов Безымянный, Зимины сопки и Удинские вулканы близки, состав андезито-дацитовый. В этой связи, проблематично утверждения, что источником питания вулканов Б. и М. Удины является промежуточный очаг П. Толбачика. В тоже время, можно высказать предположение, что у вулканов П. Толбачик и Б. и М. Удины, источник магм связан с Толудской зоной, в которой на глубине 10–20 км располагается слой, содержащий магматические очаги, в той или иной степени разогретые, о чем свидетельствуют значения параметра V_p/V_s . К такому же выводу приходили ранее вулканологи, изучавшие этот район.

Блоковое строение верхней части геологического разреза исследуемого района, контрастность физических свойств, слагающих его пород, магматические очаги, максимально развитый дайковый комплекс, присутствие в центральной части зоны сквозькорового разлома – все это создает очень сложную ситуацию для интерпретации полей скоростей и напряжений [6].

Наблюдаемый нами слой пониженных значений параметра V_p/V_s на глубинах 3–5 км, вероятно, является слоем пониженной скорости, отмеченный нами ранее [10], откуда, весьма вероятно, поступает магматическое вещество и в промежуточный очаг П. Толбачика.

Приведены результаты расчетов 3D скоростных моделей Р-волн, полученные по методу «обращенной волны» по наблюдениям вулканических землетрясений в период БТТИ 1975–1976 гг. и далее включая 1984 г. На картах-срезах на глубинах 3 и 15 км показан слой низких значений скорости. Со значениями $V_p = 4.6–5.0$ км/с, окружающий все рассматриваемые нами вулканы (рис. 5, интервалы скорости показаны штриховкой). Выделяется пятно сильно пониженных скоростей 3.8–4.6–5.0 км/с в районе расположения Удинских вулканов. Низкие значения скорости Р-волн видны на

разрезах – на широте П. Толбачика, и диагональном в направлении ЮЗ-СВ. Низкоскоростные пятна на картах и разрезах могут свидетельствовать «в пользу наличия коровых магматических питающих камер», что ранее отмечено было Б.В. Ивановым. Установленные ГСЗ в районе БТТИ "аномальные зоны", отождествляемые с питающими магматическими очагами на глубинах 2–3, 7–8 км [1, 2], могут быть или действительно очагами, или скоплениями неостывших даек. О наличии питающих магматических камер также свидетельствуют полученные нами данные распределения параметра V_p/V_s .

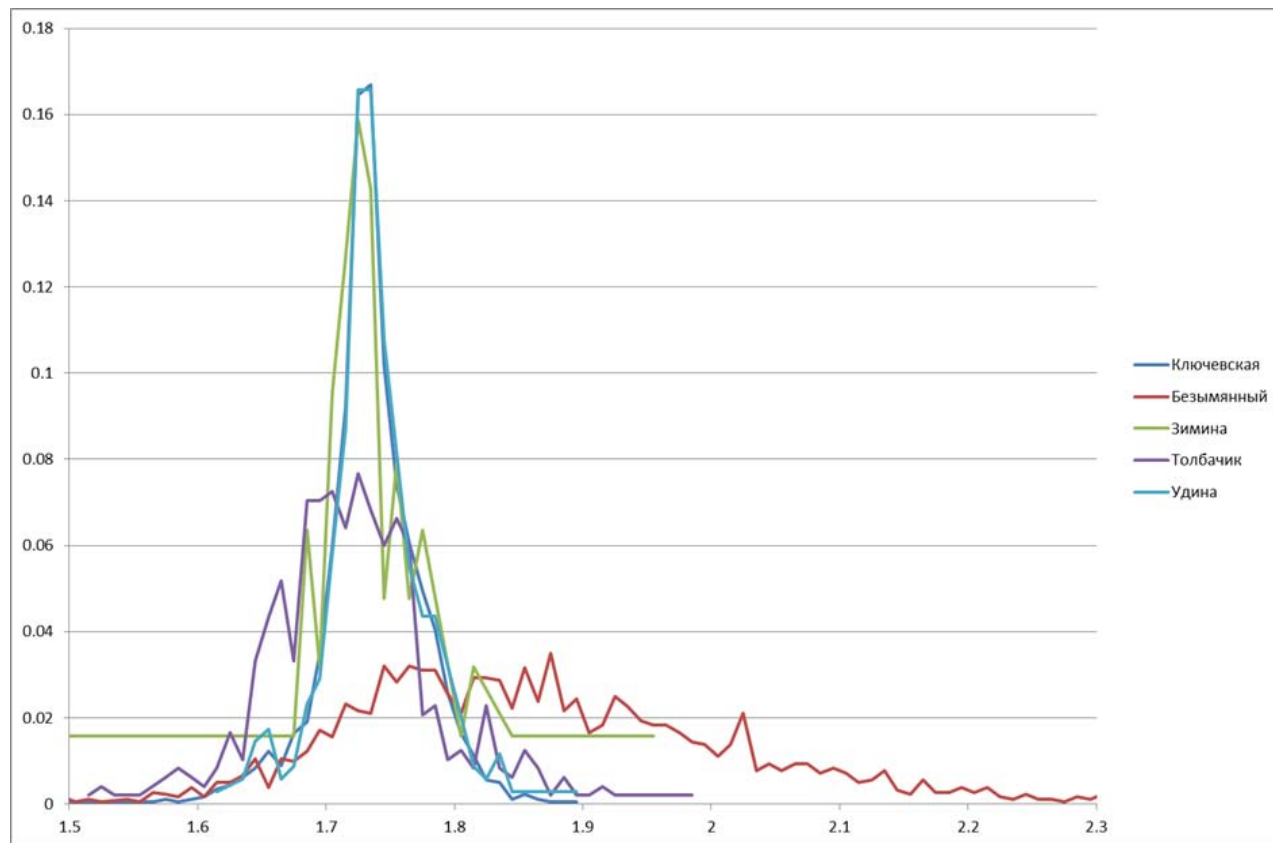


Рис. 4. Распределения параметра V_p/V_s для различных вулканов Северной группы

Для различных отделов вулканических построек и периодов активности характерно свое поведение поля значений V_p/V_s . В промежуточных магматических очагах, под вулканом Ключевской на глубинах 8–10 км и под Плоским Толбачиком на глубинах 3–5 км, наблюдаются низкие значения V_p/V_s , что связано с состоянием вещества и температуры в этих областях и поступлением из коры и мантии новой порции магматического расплава и флюидно-газовой составляющей. Как правило, можно наблюдать значительно повышенные значения параметра (до 2.0 и выше) в постройке вулкана. Наиболее ярко это видно в постройке вулканов Ключевской, Безымянный (см. рис. 1). Это может быть связано с ростом скорости V_p и падением скорости V_s , вызванными уплотнением структуры магматической геологической среды в связи с повышением давления и температуры и по ряду других причин, в том числе из-за потери флюидно-газовой компоненты и заполнения пор и трещин водой. В подтверждение высказанного предположения можно привести результаты исследований, проведенных на образцах магматических пород в условиях повышения давления и температур [13]. Можно предположить, исходя из физических характеристик, наблюдаемых на образцах при высоких давлениях и температуре, что понижение значений параметра V_p/V_s здесь вызваны наличием в среде флюидно-газовой смеси, а также повышением температуры внутри объема. Влияние трещиноватости на значения параметра V_p/V_s в среде рассматривал И.А. Гарагаш [3, 4]. При дилатансионном процессе растяжения – «растрескивании» среды – отношение V_p/V_s уменьшается. При сжатии (закрытии трещин) отношение V_p/V_s увеличивается. Различный характер изменения скоростей продольных и поперечных волн при насыщении пород жидкостью приводит к увеличению отношения V_p/V_s от 1.5–1.9 до 1.6–2.2. Соответственно возрастают модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона. Исследования, выполненные на образцах, также свидетельствуют о значительном росте коэффициента Пуассона и слабом изменении модуля Юнга при переходе образца из газоводонасыщенного в водонасыщенное состояние [13]. Результаты проведенных на образцах

экспериментов показали, что основной вклад в изменение скоростей сейсмических волн вносит температура [9].

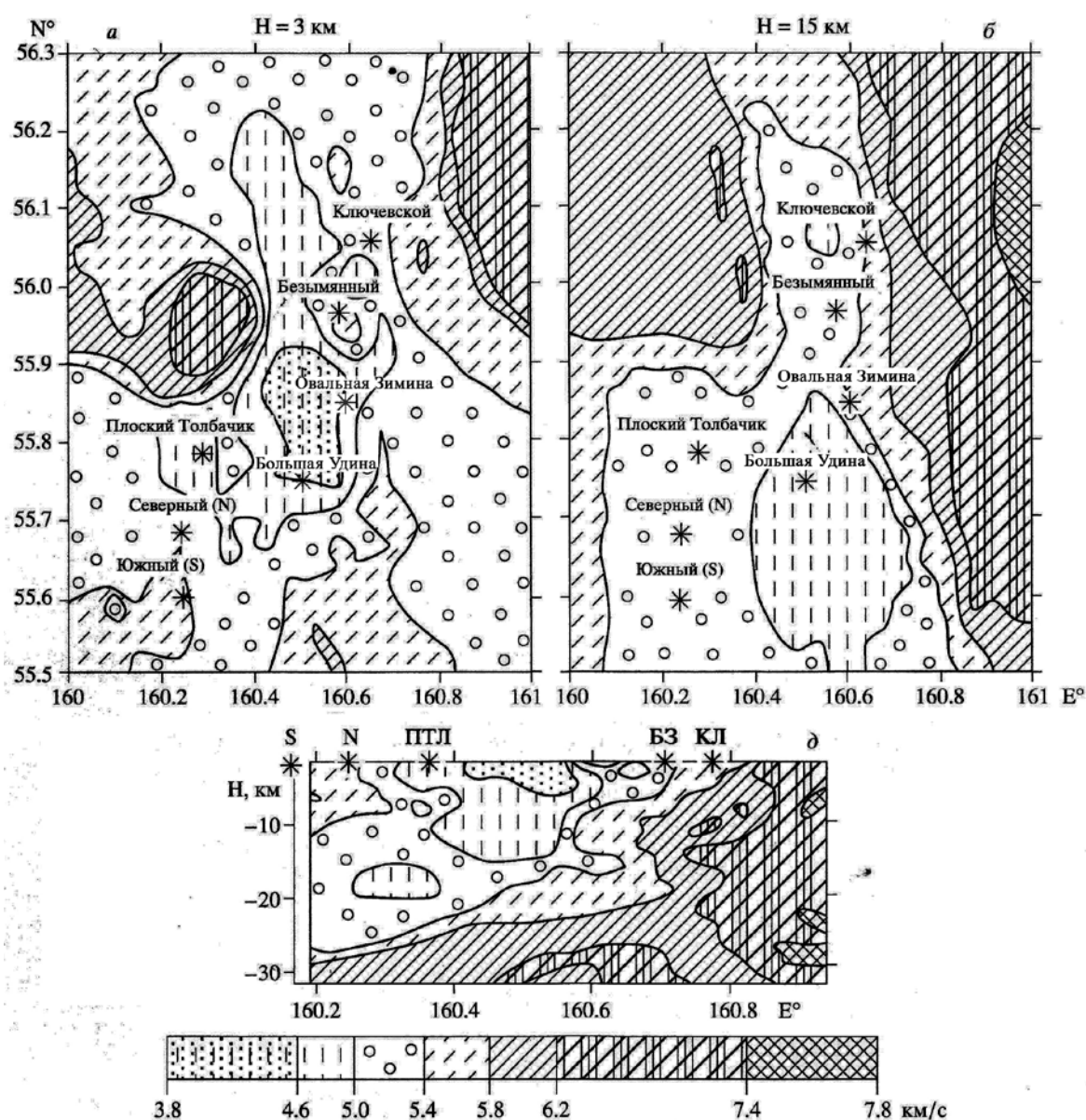


Рис. 5. Карты-срезы поля скоростей Р-волн для различных интервалов глубин: а – $H = 3$ км; б – $H = 15$ км, скоростной разрез диагональный в направлении юго-запад северо-восток

По нашим представлениям, пониженные значения V_p/V_s свидетельствуют о возможном разогреве магматического вещества и наличии флюидов в этих областях. Повышенные значения свидетельствуют о недостаточном разогреве магмы для подъема по колонне в постройку вулкана Б. Удина, или постройке структур в Толудской зоне.

По наблюдениям за параметром V_p/V_s в области активизации вулкана Б. Удина, можно утверждать, что в настоящее время разогрев магмы на глубине и поступление магматического вещества в постройку вулкана Б. Удина, видимо, недостаточен для нового извержения.

Параметр V_p/V_s в периоды развития процесса вулканической активности не остается постоянным ни во времени, ни в пространстве. Значение параметра в этом случае определяется скорее температурой и физическим состоянием вещества, чем геодинамическим полем напряжений. Структурные элементы системы вулкана имеют свои, характерные для них значения отношения V_p/V_s . Значения эти меняются в соответствии с изменениями состояния магматического вещества в них, что может быть использовано при прогнозировании вулканических извержений. Магматическая питающая система, накопление, перемещение и возможно состояние магматического вещества, отражаются в поле отношения скоростей.

Список литературы

1. Балеста С.Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 134 с.
2. Балеста С.Т., Иванов Б.В., Утнасин В.К., Аносов Г.И. Строение земной коры района Ключевской группы вулканов, особенности тектоники и вулканизма // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 7–16.
3. Гарагаи И.А. О хрупком разрушении упругих тел с большим числом трещин. В кн.: Механика тектонических процессов. Алма-Ата: Наука, 1983, С. 61–74.
4. Гарагаи И.А., Хайдаров М.С. Модель развития сейсмического процесса в зоне тектонического разлома перед сильным землетрясением // Сейсмологические исследования. 1989. № 11. С. 88–97.
5. Иванов Б.В. Андезиты Камчатки. Справочник химических анализов вулканитов и основных породообразующих минералов. М.: Наука, 2008.
6. Иванов Б.В. Некоторые особенности вулканизма Ключевской группы вулканов в связи с ее глубинным строением // Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1977. С. 35–43.
7. Каталог землетрясений. 1999–2018 гг. / Отв. исп. С.Л. Сеньюков. Режим доступа: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>.
8. Каталог землетрясений. 1971–1996 гг. / Отв. исполн. О.С. Чубарова. Режим доступа: http://www.kscnet.ru/ivs/Seismo/New_Form_Select.php.
9. Казначеев П.А., Майбук З.Ю., Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Бондаренко Н.Б. К вопросу об анализе статистики событий акустической эмиссии по данным одиночного датчика в экспериментах с термическим разрушением горных пород // Геофизические исследования. 2019. Т. 20, № 1. С. 52–64. DOI: <http://dx.doi.org/10.21455/gr2019.1-5>.
10. 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.
11. Славина Л.Б., Кучай М.С., Лиходеев Д.В., Сеньюков С.Л. Связь параметра V_p/V_s с состоянием магматического вещества и активностью Северной группы вулканов Камчатки // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 2. С. 28–50.
12. Федотов С.А. Область зарождения и подъема магм, свойства питающих каналов и магматических очагов вулканов центрального типа // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 25–29.
13. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика / Под редакцией Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.