

УДК 550.34

СКОРОСТНОЕ СТРОЕНИЕ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ В РАЙОНЕ СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ (ПО ДАННЫМ ВРЕМЕН ПРОБЕГА P -ВОЛН ОТ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ)

© 2011 г. Л.Б. Славина¹, Н.Б. Пивоварова¹, С.Л. Сениуков²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Приведены результаты расчета полей скоростей продольных волн V_p по методике обратимой волны и параметра TAU , характеризующего отношения скоростей V_p/V_s сейсмических волн от локальных вулканических землетрясений, происшедших в районе Северной группы вулканов Камчатки в период 2005–2007 гг. Построены скоростные трехмерные разрезы по профилю юго-запад–северо-восточного простираения, проходящему через вулканическую группу в направлении от вулкана Плоский Толбачик на юго-западе до вулкана Шивелуч на северо-востоке. Обнаружены изменения поля скоростей во времени и по глубине. Рассмотрены вопросы связи этих изменений с развитием процессов вулканической активизации.

Ключевые слова: скорости распространения сейсмических волн, трехмерные разрезы, вулканы Камчатки, вулканические землетрясения, параметр TAU , активность вулканов.

Введение

Недавнее извержение вулкана Эйяфьядлайокудль в Исландии [Салтыковский, 2011] привлекло к себе самое пристальное внимание не только ученых, но и широких кругов населения, наглядно показав один из аспектов вулканической опасности для современной цивилизации. Это связано с тем, что пепел от извержения распространился над густонаселенной территорией Европы и стал причиной отмены около 11 тыс. авиарейсов в апреле–мае 2010 г. На этом фоне появляются предостережения некоторых авторов [Щетинов, 1993, 2009а,б, 2010] о возможности повышения сейсмической и вулканической активности из-за глобального потепления.

Для прогнозирования вулканических извержений необходимо изучение природы вулканической активности. Эта проблема – одна из основных в современной вулканологии. Ее решение предполагает необходимость детальных исследований источников

питания, накопления и перемещения магм, строения корней и магматической питающей системы вулканов.

В данной работе приведены некоторые результаты исследований в этом направлении, выполненные в районе Ключевской группы вулканов, расположенной на севере Камчатки (Северная группа вулканов).

Район исследований, использованные данные и методы их анализа

Ключевская группа вулканов (КГВ) на Камчатке наиболее мощная на островных дугах и в зонах поддвига литосферных плит. Она находится в северной части Курило-Камчатского вулканического пояса вблизи пересечения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Столь высокая активность КГВ обусловлена интенсивностью глубинных геодинамических процессов, происходящих в этой области. В КГВ имеются действующие вулканы центрального типа: базальтовый стратовулкан Ключевской – крупнейший действующий вулкан Евразии (высота 4.8 км); известный андезитовый вулкан Безымянный (высота 2.87 км); базальтовый вулкан Плоский Толбачик (высота 3.1 км) и др. Действующий вулкан Ключевской показан на рис. 1. С начала 2009 г. и по настоящее время вулканы Камчатки – Ключевской, Шивелуч и молчавший много лет вулкан Кизимен, очень активны и производят пепловые выбросы на высоту до 10 км.



Рис. 1. Ключевской вулкан в период вершинного извержения. Фото Л.Б. Славиной, август 2010 г.

Исследования строения КГВ проводились различными геофизическими методами, включая ГСЗ [Балеста и др., 1991]. Были получены вертикальные разрезы скоростей продольных волн V_P по профилю, пересекающему всю группу, выделены основные скоростные границы [Гонтовая и др., 2004]. Однако ни один из применявшихся ранее методов не позволил проследить за изменениями скоростей P -волн во времени и их связи с процессом вулканической активизации. Разработанная авторами методика [Ли-

воварова, Славина, 2003] позволила восстановить скорость P -волны в области концентрации очагов вулканических землетрясений и проследить за ее изменением в пространстве и во времени.

В настоящей работе представлены результаты расчетов полей скоростей P -волн и параметра TAU , являющегося аналогом параметра V_p/V_s , по данным вулканических землетрясений, зарегистрированных сетью сейсмических станций в районе Северной группы вулканов Камчатки. Исследования скоростей P -волн проводились на основе исходных данных о координатах гипоцентров и временах их пробега от землетрясений, зарегистрированных цифровыми телеметрическими сейсмическими станциями и обработанных Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) за 2005–2007 гг. Первичные данные переопределению не подвергались.

В расчетах участвовали все зарегистрированные в районе КГВ землетрясения энергетических классов $3 \leq K_s \leq 7.5$. Землетрясения из фокальной зоны в расчетах не участвовали, поэтому глубина землетрясений ограничена 35 км. В силу особенностей проявления сейсмической активности, связанной с подготовкой вулканических извержений, распределение очагов было неравномерно как по глубине, так и во времени. Эта особенность потребовала использования дополнительных методов усреднения и сглаживания построенных полей.

Методические особенности расчетов поля скоростей

Используемый метод расчета скоростей сейсмических волн основан на восстановлении фронта обратимой волны и скорости его перемещения в выбранной пространственной области G на основе разностей времен компактно расположенных землетрясений. Это позволяет определять скорости P -волн в области концентрации очагов землетрясений, проследить динамику изменений поля скоростей сейсмических волн в пространстве и времени. При таком подходе исключается влияние геолого-геофизических особенностей на пути распространения волны от источника (станции) до приемника (гипоцентра).

Подчеркнем основные особенности используемого метода.

1. Скорости сейсмических волн определяются только в области очагов землетрясений.
2. Используются только разности времен первых вступлений от группы очагов на фиксированной станции, что позволяет заметно уменьшить влияние особенностей среды под станцией и на пути движения сейсмической волны.
3. В расчетах учитываются только разности координат группы очагов, за счет этого уменьшается влияние систематических ошибок при определении параметров гипоцентров.
4. Зависимость скорости сейсмической волны от координат предполагается достаточно гладкой – такой, что в области G ее можно было считать постоянной. В данных расчетах область G представляла собой цилиндр с радиусами 5 и 2 км, высотой ± 3.5 км. Центр области перемещался с шагом 5 км по горизонтали и 2.5 км по глубине.
5. Полученные на равномерной сетке значения скорости сглаживались путем построения изолиний скорости на вертикальных разрезах в плоскости XZ .

В связи с неравномерностью распределения очагов в вулканической области используемый ранее алгоритм расчета скоростей [Славина и др., 2001, 2004; Славина, Пивоварова, 2009] был модифицирован. Построение фронта обратимой сейсмической волны и

скорости его перемещения в ячейках трехмерной сетки осуществлялось на основе разностей времен пробега сейсмических волн до фиксированной станции для всех пар очагов данной ячейки. Далее значения скоростей, полученные в данной ячейке, усреднялись, и полученное значение принималось за среднюю скорость распространения сейсмической волны в данной ячейке равномерной сетки.

Таким же образом были построены вертикальные разрезы в плоскости XZ параметра TAU – аналога параметра V_p/V_s . Методика расчета параметра TAU разработана ранее и применялась в различных сейсмоактивных зонах для выявления аномальных зон в качестве предвестника сильных землетрясений и извержений вулканов [Славина, Мячкин, 2005; Славина и др., 2007].

Предпосылкой разработанного метода были представления о направленных изменениях физических параметров среды, происходящих в период подготовки сильного землетрясения или извержения вулкана. Под воздействием роста поля напряжений на последней стадии подготовки события среда теряет устойчивость, что приводит к увеличению разброса значений параметров различных геофизических полей, в том числе и поля времен пробега P - и S -волн от слабых близких землетрясений. Наблюдая вариации времен пробега P - и S -волн и их отношений T_S/T_P (параметра TAU) в пространстве и времени и проводя анализ флуктуаций относительно долговременного среднего, можно выявить временной интервал, где значения флуктуаций максимальны, и оконтурить область их локализации.

Расчеты параметра TAU производятся по приведенной ниже формуле для каждой станции в отдельности от конкретного землетрясения по данным времен прихода на станцию P - и S -волн. При этом не используется график Вадати, усредняющий данные о временах прихода P - и S -волн по группе станций, как это делалось другими авторами. Расчеты осуществляются на основе наблюдений сети сейсмических станций региона. Единичные значения параметра определяются по формуле

$$TAU = (T_S - T_P) / (T_P - T_0) + 1,$$

где $T_S - T_P$ – разность прихода P - и S -волн на станции регистрации; T_P – время прихода P -волны; T_0 – время в очаге, определенное по группе станций. Наблюдая параметр TAU и его дисперсию в пространстве и времени и проводя анализ флуктуаций относительно долговременного среднего, можно выявить временной интервал, где значения флуктуаций максимальны, и, проводя картирование параметра по площади, оконтурить аномальную зону. Анализ последовательного ряда карт позволяет выявить и оконтурить зону аномалии и проследить ее развитие во времени.

В настоящей работе значения параметра TAU усреднялись аналогично значениям V_p . Погрешность полученных значений скорости оценивается в пределах 0.2–0.4 км/с в зависимости от расположения очагов землетрясений и количества станций. Это позволяет проводить изолинии скорости на разрезах с шагом 0.5 км/с.

Для проведения расчетов введена декартова система координат с центром в точке $\varphi = 56.01^\circ$ с.ш., $\lambda = 160.63^\circ$ в.д. Направление осей декартовой системы координат выбрано так, чтобы вулканы Ключевской и Шивелуч располагались в плоскости XZ .

Район исследования, расположение вулканов Северной группы, сейсмических станций, эпицентров землетрясений, линии профиля $A-B$, вдоль которой строились разрезы, показаны на рис. 2 [Сенюков, 2006].

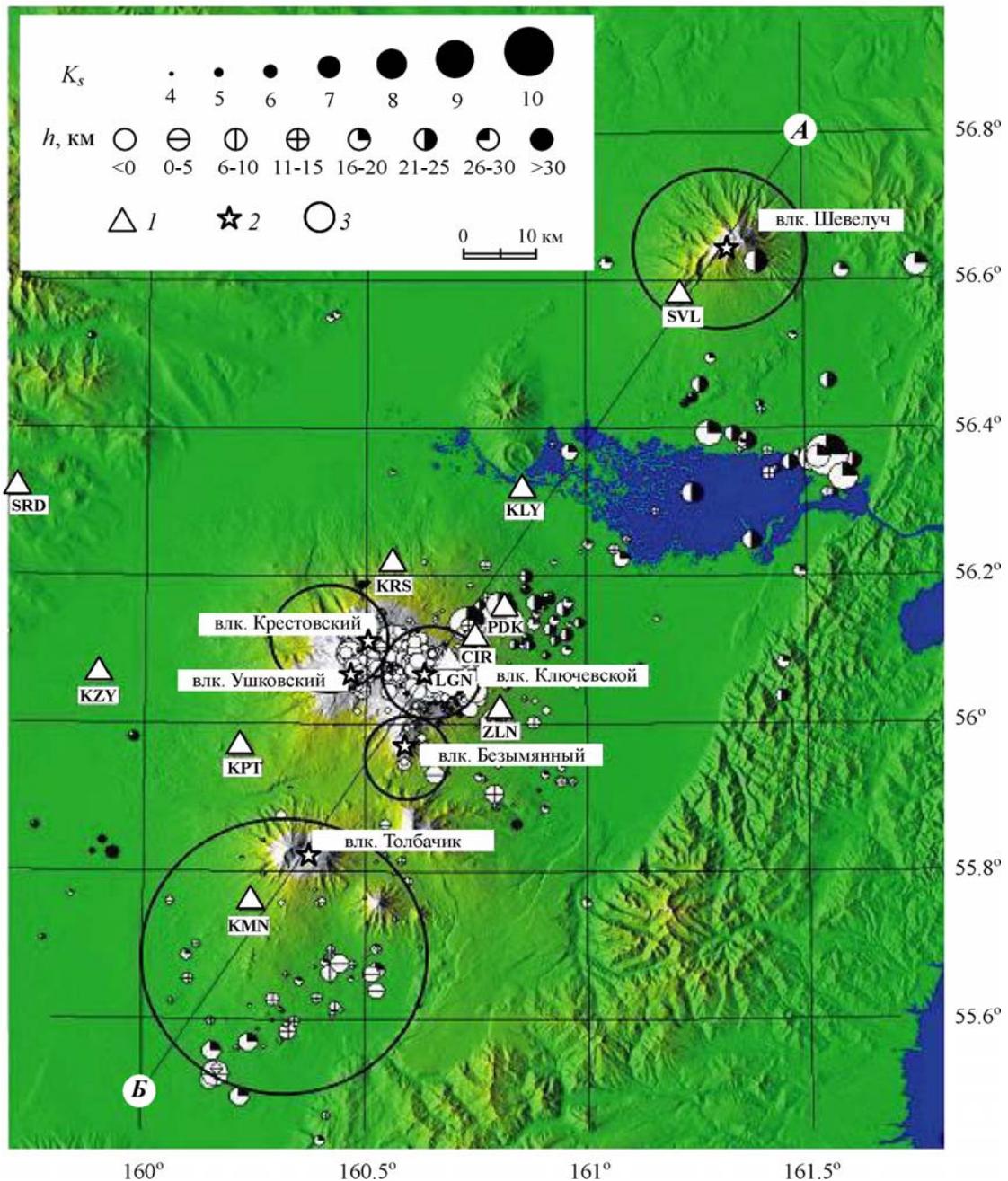


Рис. 2. Район исследования Северной группы вулканов Камчатки [Сенюков, 2006]

1 – сейсмические станции; 2 – вулканы; 3 – эпицентры землетрясений соответствующего энергетического класса K_s

Результаты расчета полей скоростей

Результаты расчетов представлены в виде серии вертикальных разрезов полей скорости V_p и параметра TAU в плоскости XZ , пересекающей КГВ в направлении ЮЗ–СВ и проходящей через вулканы Ключевской и Шивелуч.

Для выявления связи между динамикой изменения скорости по глубине и во времени и процессом развития вулканической активности приведена табл. 1, составленная по данным мониторинга активности Северной группы вулканов, проводимого в КФ ГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>).

Таблица 1. Оценка вулканической активности Северной группы вулканов

2005 г.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Шивелуч	Ж-О	О-К	-	-	-	-	-	-	3	3-Ж	3-Ж	3-Ж
Ключевской	3-Ж-О	О	О-К	О-Ж	3	3	Ж-О	3	3-Ж	3	3	3-Ж
Безымянный	Ж-К	-	-	-	3	3	-	3	3	3	3-Ж-О	3
Плоский Толбачик	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2006 г.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Шивелуч	3-Ж	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	О-К
Ключевской	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3-Ж
Безымянный	3	3	3	3	К-О	3	3	3	3	3	3	3-Ж-К
Плоский Толбачик	3	3	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2007 г.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Шивелуч	О-К	О	О	О	О-К	О-К	О-К	К	О	О-Ж	О-Ж-К	О-К
Ключевской	Ж	Ж	Ж	О-Ж	О-К	О-К	К-О	3	3	Ж	Ж	Ж-З
Безымянный	3	3	3	3	-	-	3	3	3	3-К-О	3	3
Плоский Толбачик	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Примечание. Буквами показано состояние вулканов в соответствии с принятой в вулканологии шкалой активности: з – «зеленый» – вулкан в спокойном состоянии, сейсмичность – не выше фоновой, вулкан спокоен или фумарольная деятельность, термальных аномалий – нет; ж – «желтый» – слабые локальные землетрясения, повышенный уровень эмиссии вулканических газов, сейсмичность – выше фоновой, наличие пепла в выбросах, наличие термальных аномалий; о – «оранжевый» – большое количество локальных землетрясений, лавовые потоки, высота пепловых выбросов до 8 км над уровнем моря; к – «красный» – сильные землетрясения регистрируются на удаленных станциях, высота пепловых выбросов больше 8 км над уровнем моря. I–XII – месяцы.

Для оценки вулканической активности важно также знать распределение очагов землетрясений по глубине (включая постройку вулкана) и их миграцию во времени. В табл. 2 приведена информация о количестве землетрясений под Ключевским вулканом по интервалам глубин за период 2005–2007 гг.

Для более наглядного представления изменения количества землетрясений на рис. 3 показано относительное количество землетрясений по месяцам 2005–2007 гг. на различных интервалах глубин по данным табл. 2.

Подчеркнем, что на рис. 3 для каждого месяца приведены отношения количества очагов в данном интервале глубин к максимальному количеству очагов на данной глубине в месяц за период 2005–2007 гг.

Таблицы 1, 2 и рис. 3 характеризуют сейсмическую и вулканическую ситуацию, сложившуюся в исследуемый период. Так, начало рассматриваемого периода (январь–март 2005 г.) характеризуется заметным извержением вулканов Ключевского и Безымянного, за которым последовал спад вулканической активности. За максимумом количества землетрясений на глубинах 15–35 км в конце 2005 г. – начале 2006 г. последовал подъем сейсмической активности с образованием максимума на глубинах 2–8 км в сентябре–октябре 2006 г.

Таблица 2. Распределение количества землетрясений по интервалам глубин (H , км) по данным мониторинга сейсмической активности КФ ГС РАН

2005 г.					2006 г.				
Месяц	$H < 2$	$2 \leq H < 8$	$8 \leq H \leq 15$	$15 \leq H \leq 35$	Месяц	$H < 2$	$2 \leq H < 8$	$8 \leq H \leq 15$	$15 \leq H \leq 35$
Январь	215	73	7	495	Январь	17	4	3	796
Февраль	121	10	4	2	Февраль	10	9	2	423
Март	153	2	6	1	Март	17	15	7	365
Апрель	564	5	13	4	Апрель	52	33	13	235
Май	98	14	14	30	Май	76	25	8	249
Июнь	26	25	7	22	Июнь	24	21	7	269
Июль	164	7	9	20	Июль	21	21	10	398
Август	39	74	2	246	Август	87	117	6	276
Сентябрь	92	13	8	277	Сентябрь	59	134	4	214
Октябрь	17	4	4	290	Октябрь	21	60	1	321
Ноябрь	69	9	8	921	Ноябрь	14	45	7	248
Декабрь	20	3	9	643	Декабрь	147	59	13	268
Всего.....	1578	239	91	2951	Всего.....	545	543	81	4062
2007 г.									
Месяц	$H < 2$	$2 \leq H < 8$	$8 \leq H \leq 15$	$15 \leq H \leq 35$	Месяц	$H < 2$	$2 \leq H < 8$	$8 \leq H \leq 15$	$15 \leq H \leq 35$
Январь	292	82	4	168	Август	348	11	2	10
Февраль	722	43	9	176	Сентябрь	462	14	5	16
Март	1411	11	9	83	Октябрь	1246	67	7	3
Апрель	1440	5	3	12	Ноябрь	270	24	2	7
Май	811	2	1	2	Декабрь	636	21	5	12
Июнь	1005	12	3	0	Всего.....	9069	308	55	495
Июль	426	16	5	6					

В конце 2006 г. проявился максимум сейсмической активности на глубинах менее 2 км, т.е. в верхней части постройки Ключевского вулкана. Согласно табл. 1, в 2006 г. вулканическая деятельность была достаточно спокойной. Только в мае и декабре отмечено извержение вулкана Безымянный. Активизация вулкана Шивелуч, начавшаяся в декабре 2006 г., продолжалась и в 2007 г.

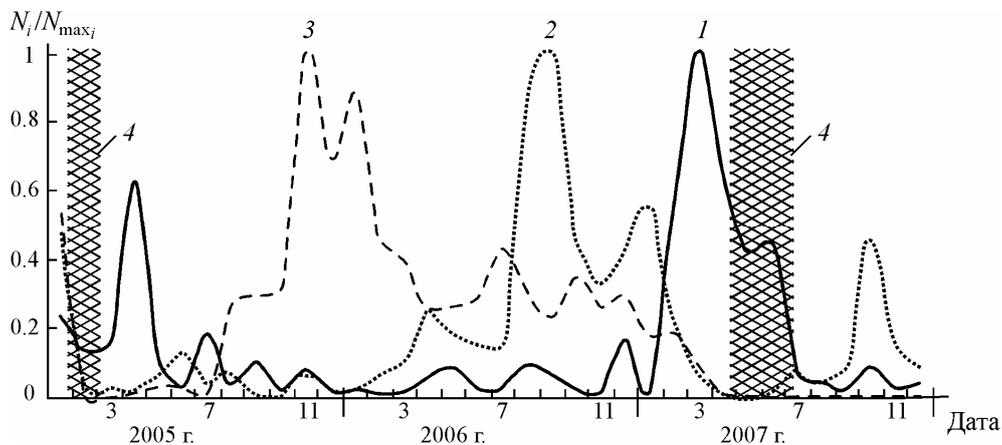


Рис. 3. Относительное количество очагов на разных глубинах в области Ключевского вулкана в 2005–2007 гг.

1 – $H < 2$ км; 2 – $2 \leq H < 8$ км; 3 – $15 \leq H \leq 35$; 4 – вершинное извержение

В начале 2007 г. продолжалась сейсмическая активность в верхней части постройки Ключевского вулкана, его вершинное извержение произошло в мае–июле 2007 г. (см. табл. 1).

Рассмотрим построенные вертикальные разрезы скорости V_p и параметра TAU за 2005–2007 гг. с шагом в полгода (рис. 4–9). Следует отметить, что представленные за полугодие разрезы скорее описывают ситуацию в те месяцы, когда было наибольшее количество землетрясений, а не среднюю за полугодие, так как согласно рис. 3 и табл. 2 количество землетрясений за месяц может сильно меняться в течение полугодия.

На разрезах можно видеть, что поле скорости V_p непостоянно. Изолинии скорости $V_p = 6.0, 6.5$ км/с, характеризующие по [Федотов и др., 2010] коромантийный слой, мигрируют вдоль профиля по глубине, образуя выступы.

Рассмотрим подробнее результаты расчета параметров V_p и TAU по годам (рис. 4, 5).

На рис. 4,а выделяется подъем изолиний скорости $V_p = 6.0$ и 6.5 км/с до глубины 8 км в направлении вулканов Безымянного и Ключевского. Во второй половине 2005 г. выступы изолинии скорости $V_p = 6.0$ км/с (с подъемом до 4 км) видны к северо-востоку от Ключевского вулкана. Значения $V_p = 6.5$ км/с появляются только на глубине 20 км.

На рис. 5 представлено поле параметра TAU в 2005 г. Интерес представляет область аномально низких значений TAU на глубине 8–10 км под Ключевским вулканом. Извержение вулканов в первой половине 2005 г. характеризуется заметным уменьшением величины TAU , появляются значения $TAU < 1.70$. Во второй половине 2005 г. сохраняется пятно пониженных значений на глубине 5–8 км, но в целом значения TAU выросли до 1.74–1.78.

В конце 2005 г. – начале 2006 г. наблюдался рост числа землетрясений на глубинах 15–35 км. По классификации КФ ГС РАН, вулкан Ключевской был спокоен («зеленый», см. табл. 1). Для 2006 г. также характерны подъем изолиний скорости $V_p = 5.5$ и 6.0 км/с в виде выступов с глубин 15–20 до 8–10 км (рис. 6, 7). Отметим, что в этот период наблюдался подъем сейсмической активности и последовавшее за этим извержение вулкана Безымянный в мае 2006 г.

Во второй половине 2006 г. значительная сейсмическая активность отмечена в интервале глубин 2–8 км. В дальнейшем состояние вулканов оставалось спокойным вплоть до декабря 2006 г., когда произошло извержение вулканов Безымянный и Шивелуч.

В первой половине 2007 г. сейсмическая активизация переместилась вверх до глубин $H < 2$ км, затем в июле сейсмичность перешла в сплошное непрерывное вулканическое дрожание, а вулканическая активность приобрела опасный («красно-оранжевый») характер (рис. 8, 9, см. табл. 1).

Поле параметра TAU в этот период непостоянно (рис. 9,а), сохраняются аномально низкие значения под вулканами Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик. Под вулканом Шивелуч в первой половине 2007 г. наблюдаются повышенные значения TAU . Во второй половине года поле резко меняется, наблюдается значительное понижение величин параметра TAU до 1.68–1.64. Напомним, что в этот период наблюдалось усиление активности вулкана (рис. 9,б).

Аномалии параметра TAU , вероятно, свидетельствуют о состоянии вещества в этой области и связаны с магматическими расплавами в промежуточных вулканических очагах. Поле параметра TAU изменяется под воздействием меняющегося в периоды развития вулканической активности поля напряжений.

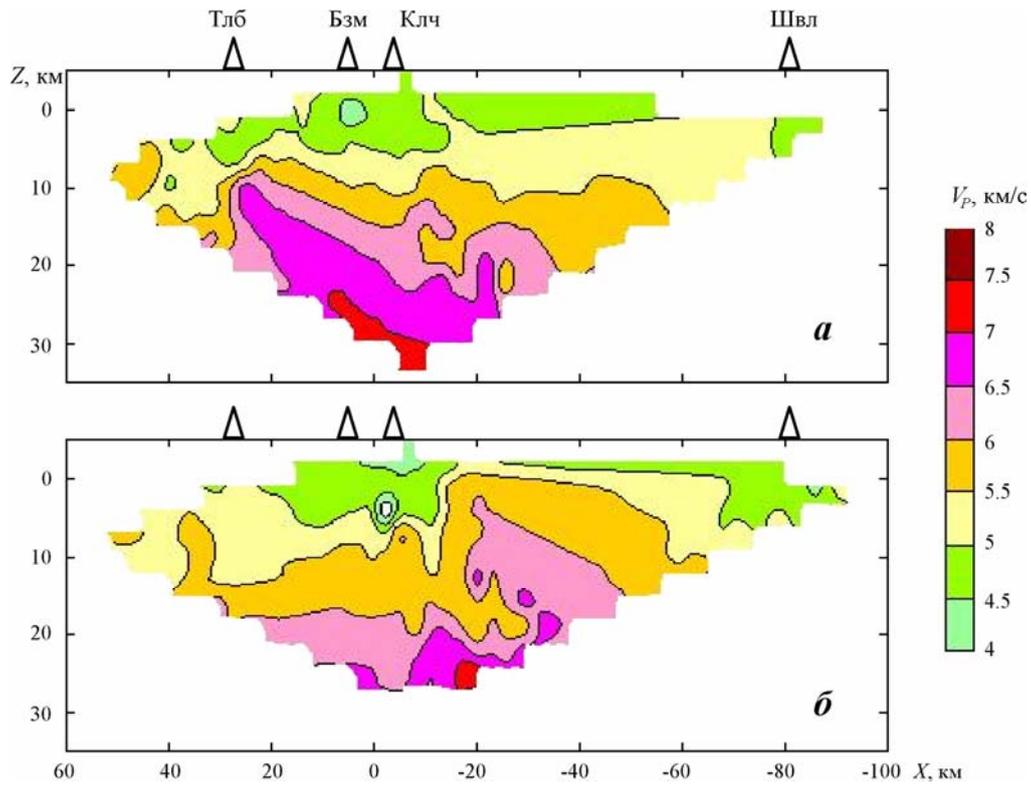


Рис. 4. Изолинии поля скорости P -волны в плоскости XZ в 2005 г.

На рис. 4–9: *a* – первая половина года, *б* – вторая половина года. Вулканы: Тлб – Плоский Толбачик, Бзм – Безымянный, Клч – Ключевской, Швл – Шивелуч

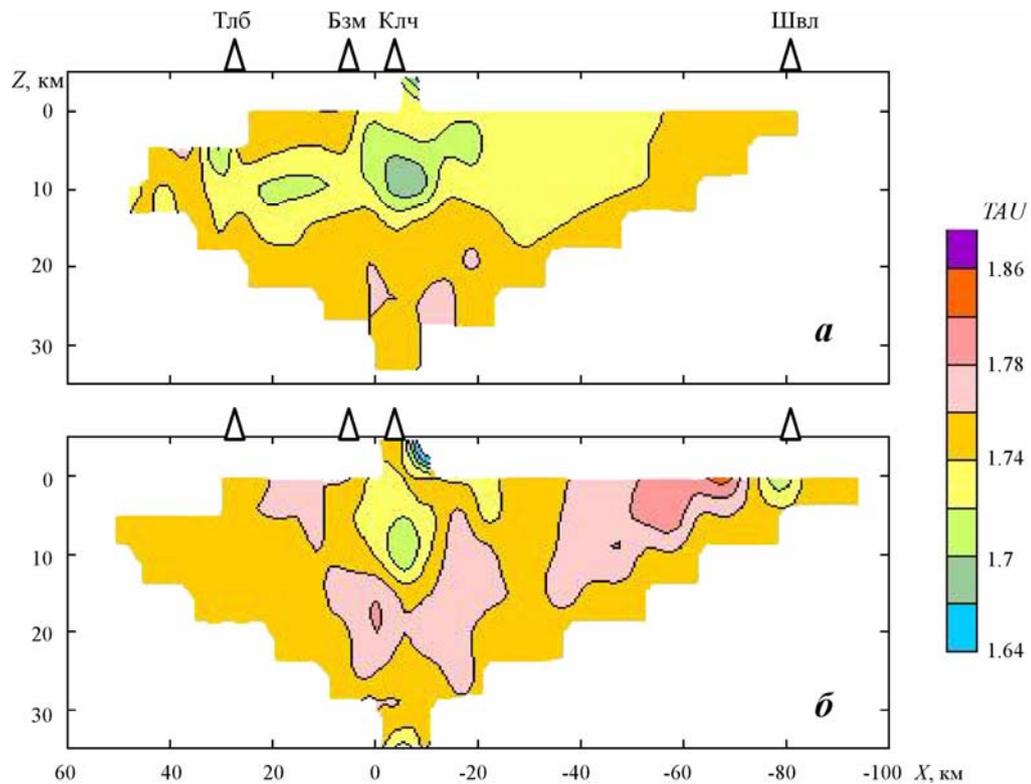


Рис. 5. Вертикальное сечение поля параметра TAU в 2005 г.

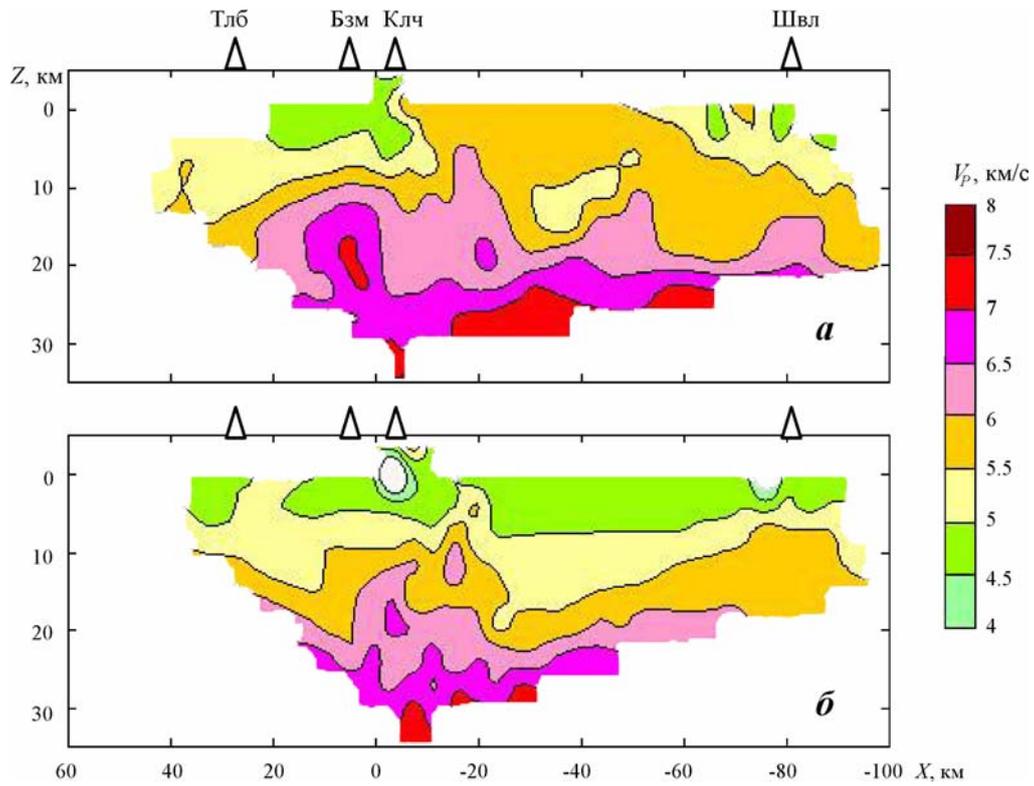


Рис. 6. Изолинии поля скорости P -волны в плоскости XZ в 2006 г.

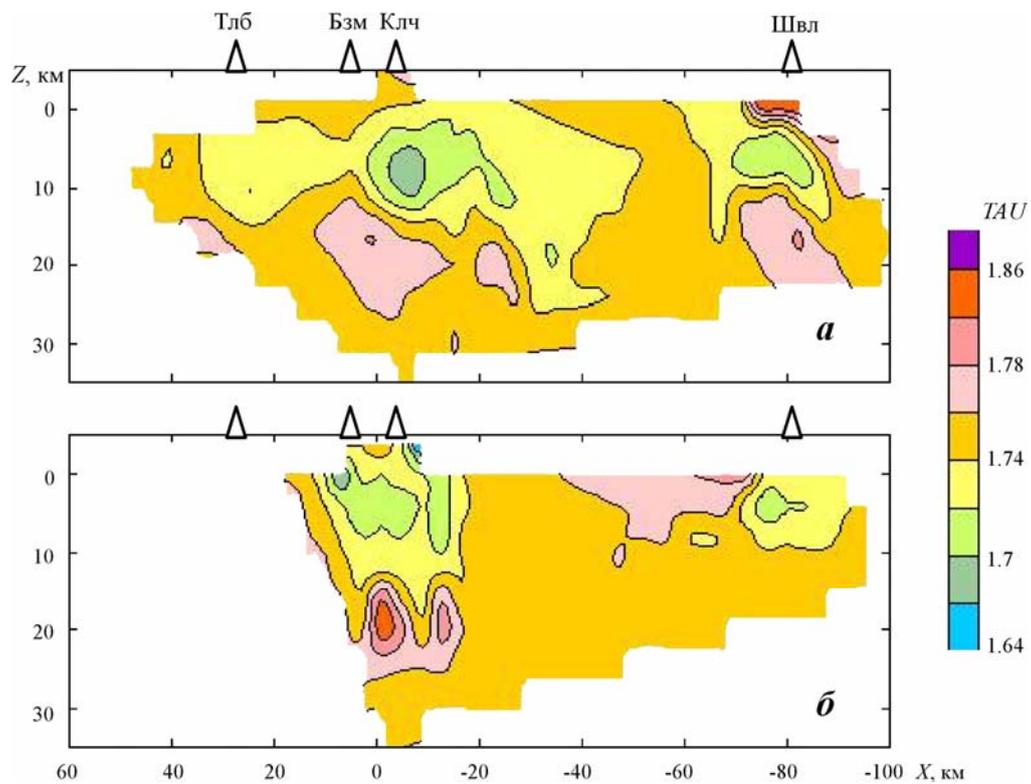


Рис. 7. Вертикальное сечение поля параметра TAU в 2006 г.

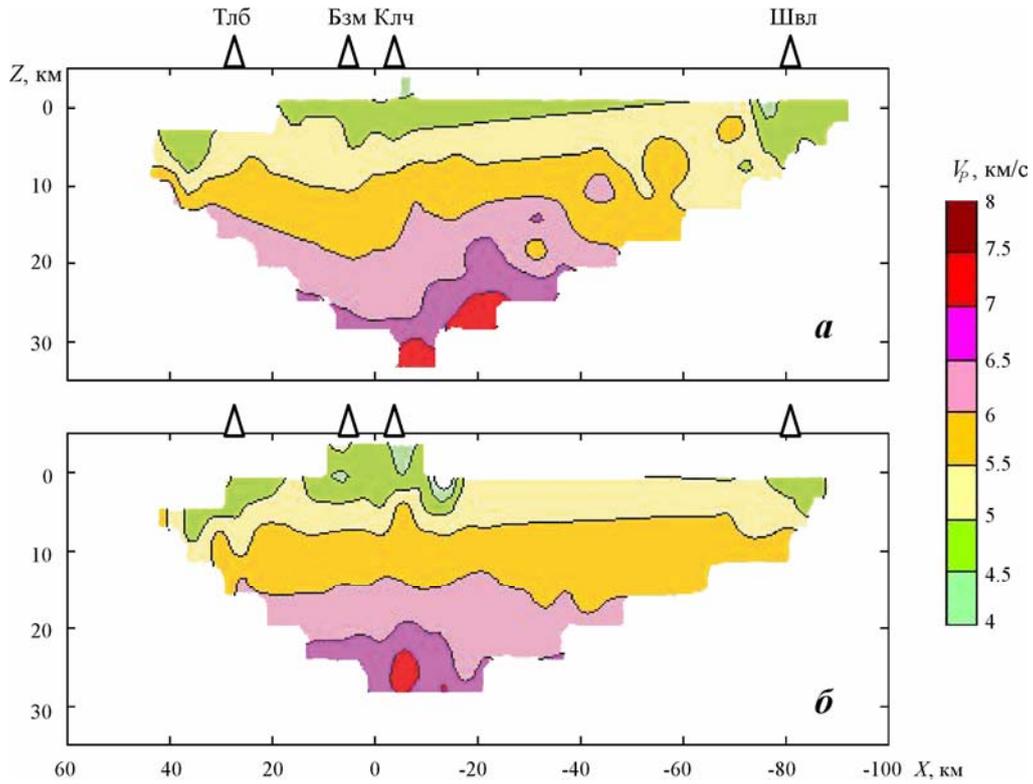


Рис. 8. Изолинии поля скорости P -волны в плоскости XZ в 2007 г.

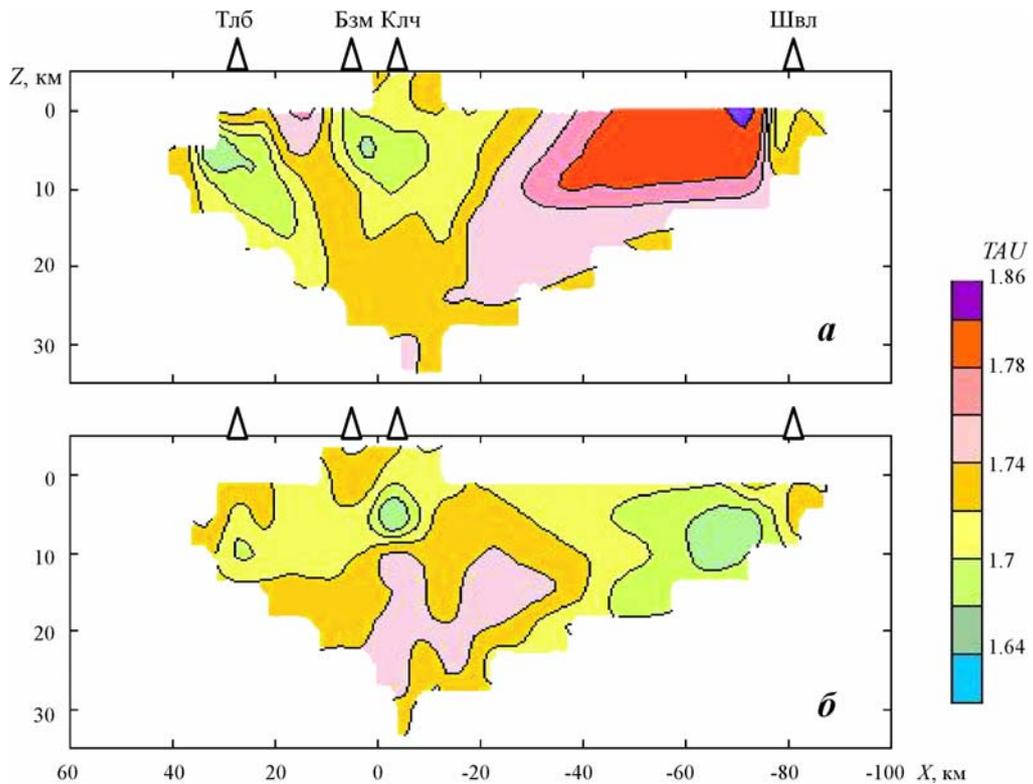


Рис. 9. Вертикальное сечение поля параметра TAU в 2007 г.

Заключение

Разработанная авторами методика обратимой волны позволила восстановить скоростное строение в районе Северной группы вулканов Камчатки (в области концентрации очагов землетрясений до глубин 40 км) и проследить за флуктуациями скорости P -волн по глубине и во времени. Ни один из применявшихся ранее методов в силу методических особенностей не позволял проследить динамику скоростей и их связи с вулканической активностью.

Полученные данные о непостоянстве поля скоростей и миграции вверх скоростных границ (изолиний поля), характеризующих коромантийную смесь, свидетельствуют о подъеме и внедрении высокоскоростных магм с глубин в промежуточные магматические питающие очаги, что подтверждает предположения вулканологов.

Параметр TAU , вероятно, отражает состояние коромантийного вещества в промежуточных питающих очагах. Он имеет аномально низкие значения в области промежуточного очага под Ключевским вулканом на глубинах 8–10 км, а также поле пониженных значений в районе вулканов Безымянный и Плоский Толбачик в 2006 г., что, вероятно, свидетельствует об изменении напряженного состояния и связано с динамикой развития вулканического процесса.

В дальнейшем планируется провести за длительный период наблюдений более полные исследования динамики поля скоростей, связанной с процессом вулканической активности в области Ключевской группы вулканов.

Литература

- 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.
- 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.
- Пивоварова Н.Б., Славина Л.Б.* Методические аспекты алгоритма восстановления трехмерного скоростного поля // *Математические методы в геофизике*. Новосибирск, 2003. С. 69–74.
- Сеньюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 3. С. 68–78.
- Салтыковский А.Я.* Извержение вулкана Эйяфьядлайокудль (Исландия) весной 2010 г. и возможные последствия // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т.10, № 3. С. 20–37.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В.* Кинематические предвестники сильных сейсмических событий (методика и результаты прогноза землетрясений на примере Камчатки) // *Геофизические исследования*. 2005. № 3. С. 24–37.
- Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б.* Динамика поля скоростей сейсмических волн в периоды сейсмической и вулканической активизации на Камчатке / Отв. ред. Е.А. Рогожин. М.: ИФЗ РАН, 2009. 79 с.
- Славина Л.Б., Гарагаш 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.
- 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. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 377–386.

Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Рогожин Е.А. Оценка сейсмической обстановки на Камчатке по данным мониторинга прогностического параметра TAU // Геофизические исследования. 2007. № 8. С. 3–8.

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.

Щетинов С.А. Углекислый газ и климатические изменения // Земля и Вселенная. 1993. № 2. С. 11–17.

Щетинов С.А. Глобальное потепление: корни и механизмы // НТР. 2009а. Т. 88, № 1. С. 16–22.

Щетинов С.А. Новая климатическая ситуация: парниковый эффект и уровень моря // НТР. 2009б. Т. 88, № 2. С. 40–44.

Щетинов С.А. Супервулканы в современных условиях // НТР. 2010. Т. 89, № 2. С. 3–8.

Сведения об авторах

СЛАВИНА Лидия Борисовна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: (499) 254-87-25. E-mail: slavina@ifz.ru

ПИВОВАРОВА Наталья Борисовна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: (499) 254-87-25. E-mail: PIVNB40@mail.ru

СЕНЮКОВ Сергей Львович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Камчатский филиал Геофизической службы РАН. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. E-mail: ssl@emsd.iks.ru

VELOCITY STRUCTURE OF CRUST AND UPPER MANTLE NEAR THE NORTHERN GROUP OF KAMCHATKA VOLCANOES (BASED ON DATA OF P -WAVE FROM VOLCANIC EARTHQUAKES)

L.B. Slavina¹, N.B. Pivovarova¹, S.L. Senyukov²

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

² Kamchatka Branch of Geophysical Service, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. Calculation results of the P -wave velocity V_p field obtained with the reversible wave technique and TAU parameter characterizing the ratio V_p/V_s for the waves from local volcanic earthquakes occurred near the Northern group of Kamchatka volcanoes in 2005–2007 are given. 3D velocity sections are plotted along the profile of south-west-north-east strike crossing the volcanic group in the direction from Plosky Tolbachik volcano in south-west to Shiveluch volcano in north-east. Velocity field changes in time and depth are revealed. Relationships of the changes with the processes of volcanic activity are considered.

Keywords: seismic wave velocity, Kamchatka volcanoes, 3D-section, volcanic earthquakes, TAU parameter, volcano activity.