



УДК 550.34+551.21

В. А. Дроздин¹, С. Я. Дрознина²

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: dva@emsd.ru*

² *Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: sva07@emsd.ru*

Пространственно временное распределение землетрясений при трещинном Толбачинском извержении им. 50-летия ИВиС

По данным Лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН извержение началось 27 ноября 2012 г. 5:15:00 UTC. Демонстрируется, что пространственно-временное распределение эпицентров землетрясений в районе вулкана Плоский Толбачик с 1 августа 2012 г. по 28 февраля 2013 г. может быть описано в виде 4-х, практически не перекрывающихся, областей: 1 – основная, 2 – конусная, 3 – южная, 4 – северная. Для этого в периоде наблюдений выделен интервал времени за 27 ноября 2012 г. с 7:24 по 8:24 UTC. Эпицентры землетрясений до этого интервала располагаются в первой области, в течение интервала – во второй, а после интервала в третьей и четвёртой. Первая и вторая области вытянуты на СЗ, как и направление вулканического хребта вулкана Толбачик; третья и четвёртая расположены параллельно направлению ареальной зоны.

Ранний опыт предсказания извержений вулканов Толбачик и Ключевской по сейсмическим данным

Предыдущее извержение в этом районе началось в 21ч 45 мин 5 июля 1975 г. Место и время его начала было успешно предсказано [1, 7]. В ходе этого Большого Трещинного Толбачинского извержения были выполнены оправданные прогнозы ряда новых прорывов по сейсмическим данным.

Результаты исследований БТТИ и побочных извержений Ключевского вулкана позволили П. И. Токареву [1, 8] сделать вывод, что основными прогностическими признаками начала побочного и ареального извержения базальтовых вулканов является предваряющий рост числа землетрясений в месте прорыва и снижение количества и энергии землетрясений в рое за 1–3 дня до извержения. Так, например, по П. И. Токареву [1, 7] с 27 июня – 5 июля 1975 г. в течение 9 суток наблюдался предваряющий рой вулканических землетрясений. В некоторые дни регистрировалось более 50 событий с $K_S > 7,5$. В период с 21 ч 4 мин 5 июля до 21ч 45 мин 5 июля на фоне слабого уровня сейсмической активности не было зарегистрировано ни одного землетрясения класса 7,5 и выше.

Сейсмичность района вулкана Плоский Толбачик в период 1 августа 2012 г. – 28 февраля 2013 г.

По данным Лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН 26 ноября ~ в 14:00 UTC начался рой землетрясений в районе вулкана Плоский Толбачик. 27 ноября в 05:15 стали регистрироваться сейсмические со-

бытия, которые ассоциировали с началом Толбачинского извержения, с 08:00 UTC – вулканическое дрожание – возможное появление лавового потока. В 10:00 UTC из п. Козыревск сквозь облачность наблюдалось свечение и пепловые выбросы над кратером, пепел распространялся на Север, северо-запад.

Сейсмическая обстановка описываемого извержения не соответствовала предложенному П. И. Токаревым алгоритму прогноза. Первое усиление сейсмической активности замечено 9 сентября 2012 г., когда в районе вулкана Плоский Толбачик была зарегистрирована повышенная (или выше фонового уровня) сейсмичность. Понятия «фоночная» сейсмичность и «выше фона», используемые в КФ ГС для оценки состояния вулканов пояснены в работах [5, 6]¹. Далее в течение сентября – октября сейсмичность была на фоновом уровне. Следующее усиление было зафиксировано 10, 12, 13, 17 ноября, и после небольшого перерыва, повышенная сейсмичность, зарегистрированная 25 ноября, плавно переросла в рой вулканических землетрясений и далее никакой сейсмической паузы, предваряющей извержение, отмечено не было.

Землетрясения определяются временем, координатами эпицентра, глубиной гипоцентра, энергией. Землетрясения характеризуют некоторые области изменения свойств и поля напряжений. Например, на стыках тектонических плит, в геотермальных

¹ Ежедневно обновляемая информация об активности вулканов доступна по адресу <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>

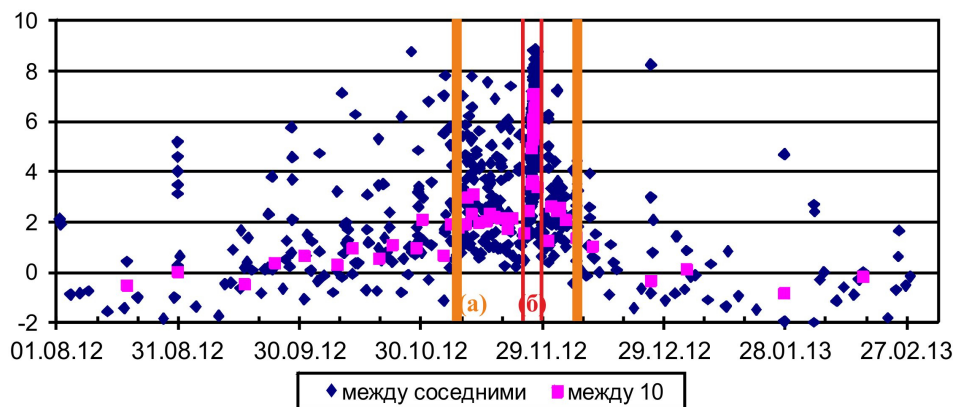


Рис. 1. Логарифм частоты землетрясений (величина обратная времени между каждым или между каждым десятым землетрясением). Выделяются два интервала изменения параметра: а) (большой) — с 08 ноября 2012 г. по 07 декабря 2012 г.; б) (маленький) — с 26 ноября 2012 г. по 27 ноября 2012 г.

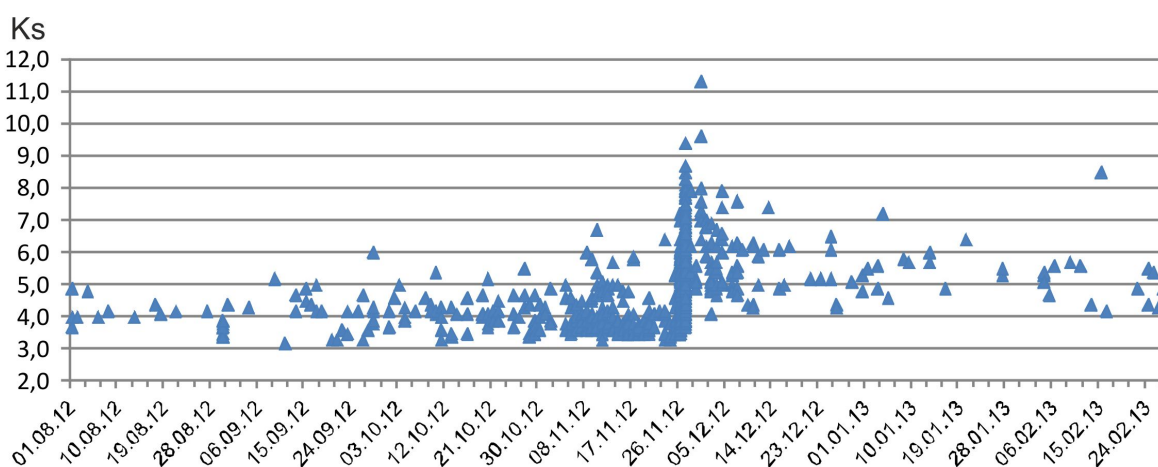


Рис. 2. Класс землетрясений.

резервуарах или в районах водохранилищ и т. п. При извержениях землетрясения предлагается коррелировать с движением, активизацией магмы.

Заметим, что нет автоматического алгоритма группировки землетрясений по месту и времени и их объединение зависит от воли интерпретатора.

Для сопоставления с подготовкой и ходом вулканического извержения во временном ряде выделяются отдельные интервалы времени, демонстрирующие существенное изменение параметра. Чаще всего используется частота извержений (или число извержений в сутки), перегибы в графике суммарной сейсмической энергии и т. п. На рис. 1 показано изменение логарифма частоты землетрясений (величина обратная времени между землетрясениями) со временем. На этом графике можно выделить интервал а) — 08 ноября 2012 г. — 07 декабря 2012 г. и интервал б) — 26 ноября 2012 г. — 27 ноября 2012 г. (рой землетрясений) как зоны существенного изменения параметра. До 8 ноября в районе вулкана Плоский Толбачик (в радиусе 20 км от вулкана) в основном происходили землетрясения с энергетическим классом $K_S = 4,0 \pm 1$ [9], рис. 2. К моменту начала извержения $\sim 05:15$ 27 ноября

2012 г. — наблюдался рост класса землетрясений. Наиболее сильное землетрясение с $K_S = 11,3$ произошло в Южной зоне (3) 30 ноября 2012 г.

Рассмотрим более подробно изменение логарифма частоты землетрясений в коротком промежутке времени — около трёх суток с начала роя вулканических землетрясений, рис. 3. Момент начала регистрации роя землетрясений показан чертой с цифрой 1, возможное начало извержения — чертой с цифрой 2, интервал времени, когда землетрясения регистрировались в межконусной области, показан цифрой 3. Наибольшее землетрясение ($K_S = 8,1$) в межконусной области произошло вне выделенного для данной зоны временного интервала в 05–38 UTC, рис. 4.

Для характеристики сейсмической обстановки в данной работе мы выделили интервал времени 1 августа 2012 г. — 28 февраля 2013 г., т. е. рассматривали четыре месяца до извержения и три месяца после его начала. На рис. 5 представлена карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных в этот период и проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии АВ. Для исследования выбран район с координатами: широта — $55,62\text{--}56,0^\circ$;

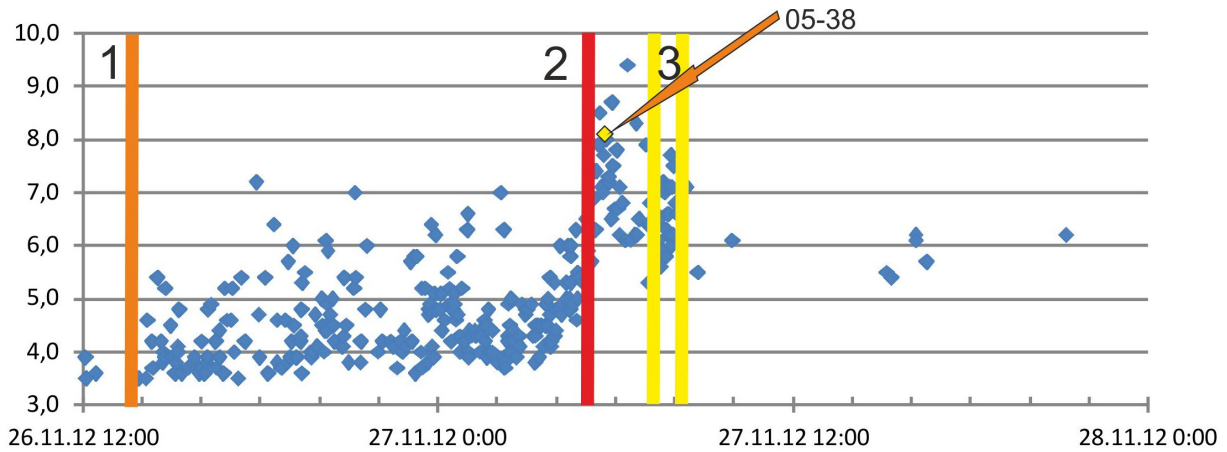


Рис. 3. Логарифм частоты землетрясений. 1 — начало роя землетрясений; 2 — возможное начало извержения по сейсмическим данным; 3 — интервал времени, когда землетрясения регистрировались в конусной области 27 ноября 2012 г. 07:24 – 08:04 UTC.

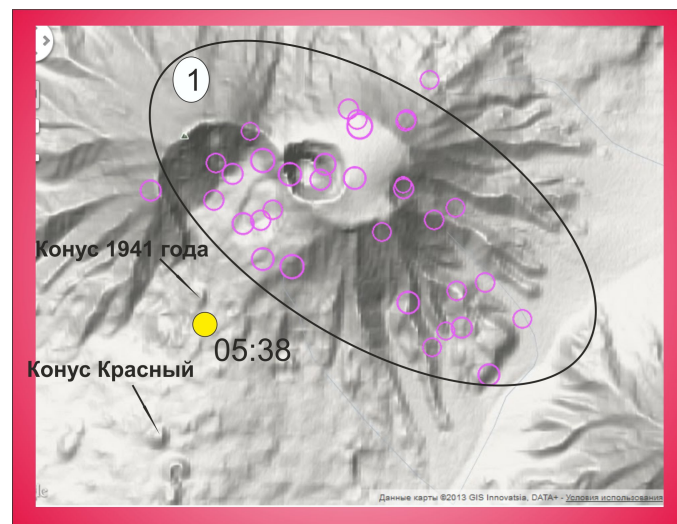


Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений за 27 ноября 05:00–07:23 UTC.

Число землетрясений, зарегистрированных в выделенных областях в разные интервалы времени.

		основная	межко- нусная	северная	южная	прочие
до	август	16 (76%)	2	1	1	1
	сентябрь	26 (100%)	–	–	–	–
	октябрь	54 (80%)	1	6	3	3
	ноябрь (рой 26 ноября 2012 г. с 14:00)	446 (98%) (в т.ч. 270)	2 –	4 –	2 –	–
27 ноября 2012 г. 07:24–08:04		–	19 (82%)	4		1
после	ноябрь с 27 ноября 2012 г.	4	1	8 (40%)	7 (35%)	–
	декабрь 2012	1	2	28 (51%)	24 (44%)	5

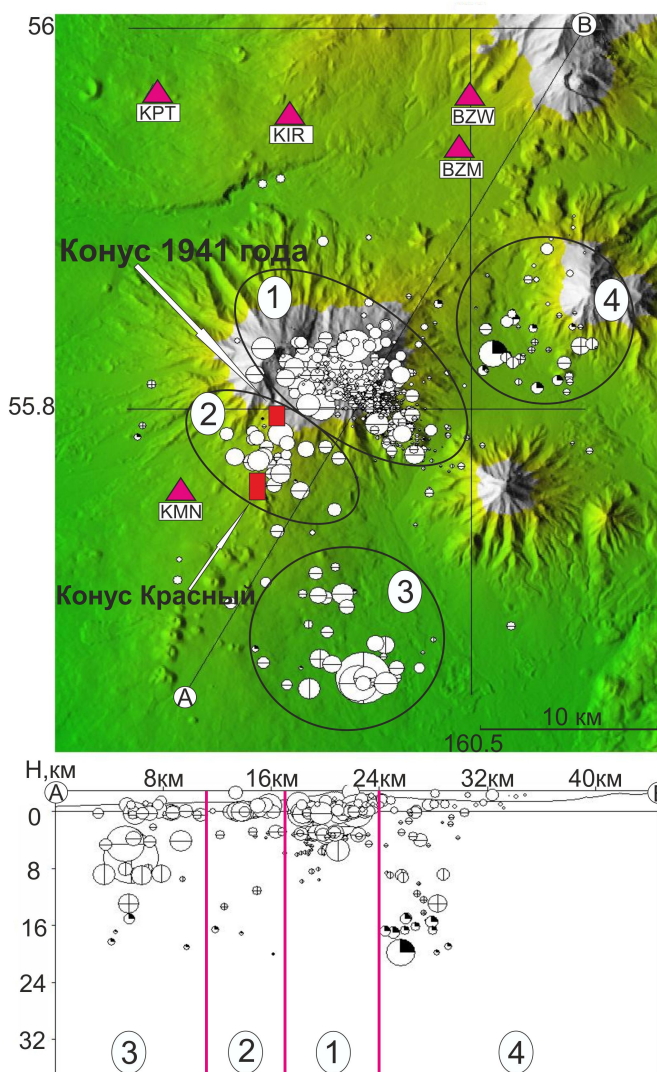


Рис. 5. А) Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных в районе вулкана Плоский Толбачик за период с 1 августа 2012 г. — 28 февраля 2013 г.; цифрами отмечены четыре выделенные зоны, треугольниками показаны сейсмические станции; Б) проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии АВ.

долгота — $160,15-160,7^\circ$. Пространственно-временное распределение эпицентров землетрясений в районе вулкана Плоский Толбачик нами описано в виде 4-х, практически не перекрывающихся, областей: 1 — основная, 2 — межконусная, 3 — южная, 4 — северная. Для этого в периоде наблюдений выделен интервал времени за 27 ноября 2012 г. с 07:24 по 08:04 UTC. Эпицентры землетрясений до этого интервала располагаются в первой области, в течение интервала — во второй, а после интервала в третьей и четвёртой. Первая и вторая области вытянуты на СЗ, как и направление вулканического хребта вулкана Толбачик [4]; третья и четвёртая расположены параллельно направлению ареальной зоны. В табл. 27 показано число землетрясений, которые не отвечают установленной закономерности:

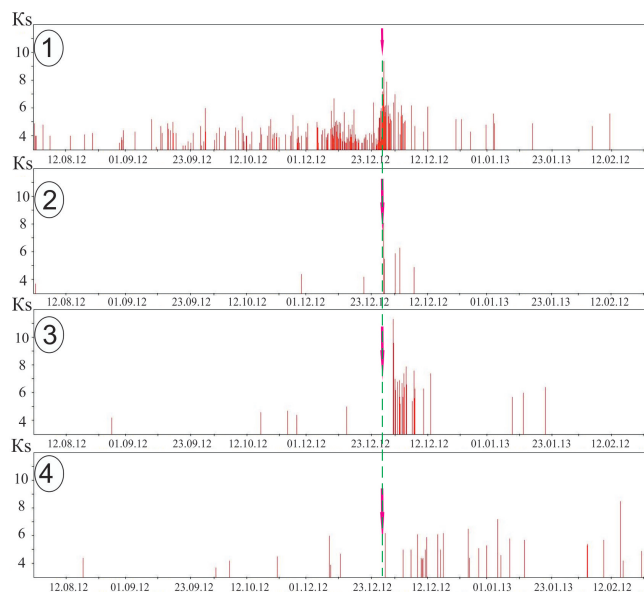


Рис. 6. Энергетический класс землетрясений для каждой выделенной на карте — рис. 5 зоны. Стрелкой отмечен момент времени 27,11.12 05:15 UTC — возможное начало извержения по сейсмическим данным.

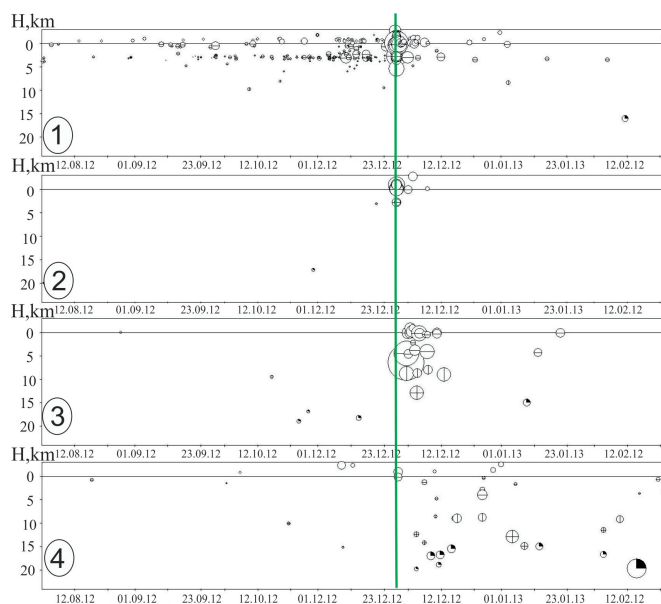


Рис. 7. Глубина землетрясений для каждой выделенной на карте — рис. 5 зоны. Чертой отмечен момент времени 27,11.12 05:15 UTC — возможное начало извержения по сейсмическим данным.

их эпицентры попадают в чужую зону. На рис. 6 и 7 представлены класс землетрясений, и глубина во времени отдельно для каждой выделенной зоны. Сами зоны отмечены кругами на карте (рис. 5) и обозначены цифрами. На графиках хорошо видно, что каждой зоне соответствует свой временной интервал.

Представляет интерес сейсмичность в выделенных зонах за более длительный период.

Сейсмичность района вулкана Плоский Толбачик в период 1 января 1999 г. – 31 июля 2012 г.

В 1996–1998 гг. были существенно улучшены условия сейсмологических наблюдений на Камчатке, в том числе и в районах действующих вулканов [2, 5, 6]. В результате в КФ ГС РАН с 1999 г. существует каталог вулканических землетрясений, который в настоящее время дополняется в режиме близком к реальному времени.

Карта общей сейсмичности за рассматриваемый период представлена на рис. 8. Для исследования выбран район с координатами: широта – 55,62–56,0°; долгота – 160,15–160,7°. Также показано расположение сейсмических станций и положение активных конусов: конус, образовавшийся при извержении в 1941 г. и конус Красный. Далее более подробно рассмотрим сейсмичность в каждой выделенной нами ранее зоне. На рис. 9 показана карта эпицентров землетрясений, проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии АВ и графики сейсмической активности для основной зоны (1). На протяжении всего периода наблюдается постепенное накопление энергии. Слабая сейсмичность в межконусной зоне (2) наблюдалась до 2005 г., рис. 10, далее регистрировались единичные землетрясения. Сейсмичность в южной зоне (3) представлена на рис. 11. В этот период там постоянно регистрируются землетрясения в диапазоне глубин от 0 до 24 км. Северная область (4) отличается компактным расположением эпицентров землетрясений, рис. 12. Усиление сейсмической активности на глубине 0–5 км наблюдалось в октябре 2006. На вертикальной проекции очагов отмечается некоторый наклон в сторону Плоского Толбачика.

Интерпретация

Следствием вулканических извержений является продуцирование на дневную поверхность глубинного вещества. Наличие такого, направленного вверх, да ещё иногда с большой (в сотни метров в секунду) скоростью выноса, предопределило поиск механизмов возникновения избыточного давления. Сжатие очага магмы тектоническими причинами можно назвать предположением о прямом возникновении избыточного давления. С. А. Академиком Федотовым развивается положение о возникновении избыточного давления при уменьшении плотности вещества во время плавления [10] (в т.ч., например, разогрев кислого очага инъекцией основной магмы). В рамках модели газлифта [3], также как и модели термолифта, общего избыточного давления не требуется.

В вертикальных потоках, в отличие от горизонтальных, необходимо в общем давлении не только учитывать потери на трение, но и нивелирующую составляющую (аналог гидростатического давления). Так, при том же общем давлении нивелирующая составляющая может быть уменьшена, например, за счёт появления свободного газа, тогда перепад давления на трение может быть увеличен и обеспе-

чит наличие вертикального потока. Очевидно, что такая модель процесса без роста давления существенно меняет представления о возможных деформациях на вулканах до и после извержения.

В рамках модели газлифта можно оценить соотношение наблюдаемой продукции и требуемого объёма очага. Заметим, что определение «жидкая лава» или «жидкий» лавовый поток не точен. По-видимому, многим при этом представляется течение расплавленного силикатного вещества. На самом деле происходит течение газированного расплава, вспененного расплава – суспензии. Запишем удельный вес γ газированного расплава в виде $\gamma = \gamma_{ж}(1 - \varphi) + \gamma''\varphi$ через $\gamma_{ж}$ – плотность расплава, γ'' – плотность газа и φ – объёмную долю газа. Далее удельный вес газированного расплава γ будем выражать в виде $\gamma = \gamma_{ж}(1 - \varphi)$, считая, что второе слагаемое незначительно. Будем полагать, что φ_0 – объёмная доля газа на поверхности. Изменение объёмной доли газа с глубиной, точнее с давлением P , выражается через атмосферное давление P_a : $\varphi = \varphi_0 P_a / P$. Полагая, что в результате извержения происходит выделение газа из расплава в свободную фазу, удельный вес уменьшается, на поверхности появится избыточный объём. Увеличение высоты колонны расплава при газировании можно записать в виде:

$$h_i = \frac{1}{g} \int_{P_a}^{P_i + P_a} \left[\frac{1}{\gamma_{ж} \left(1 - \varphi_0 \frac{P_a}{P}\right)} - \frac{1}{\gamma_{ж}} \right] dP$$

или

$$h = \varphi_0 H_0 \ln \left[1 + \frac{H}{H_0(1 - h_0)} \right]$$

где H_0 – высота слоя расплава, соответствующая атмосферному давлению. Например, при плотности расплава 2,5 г/см³ – $H_0 = 4$ м; при 2,8 г/см³ – $H_0 = 3,57$ м. Объёмная доля газа в лаве на истоке, имеющей плотность 2,2 г/см³, $\varphi_0 = 0,12 - 0,215$.

На рис. ?? показан расчёт увеличения высоты колонны расплава в зависимости от его положения: А) кривая h_1 получена при $\varphi_0 = 0,12$, $H_0 = 4$ м; кривая h_2 при $\varphi_0 = 0,215$, $H_0 = 3,57$ м. Увеличение высоты составляет всего 3–6 м. Причём увеличение колонны в основном происходит на первом километре. Если полагать, что то же объёмное содержание достигается не на поверхности, а глубже, например, при 10 атм, тогда интегрирование ведётся от уровня сепарации H_0 и увеличение высоты составит 20–40 м, рис. ?? Б). Так как требуется 4 м, то магматический очаг может быть представлен в виде интрузии, расположенной на выбранном уровне.

Площадь основной зоны распределения землетрясений ~ 75 км², а объём продукции извержения $\sim 0,3$ км³. Если полагать, что область землетрясений соответствует области вспенивания расплава, то высота колонны должна увеличиться на $0,3/75$ км = 4 м. Таким образом, по порядку соответствует расчёту.

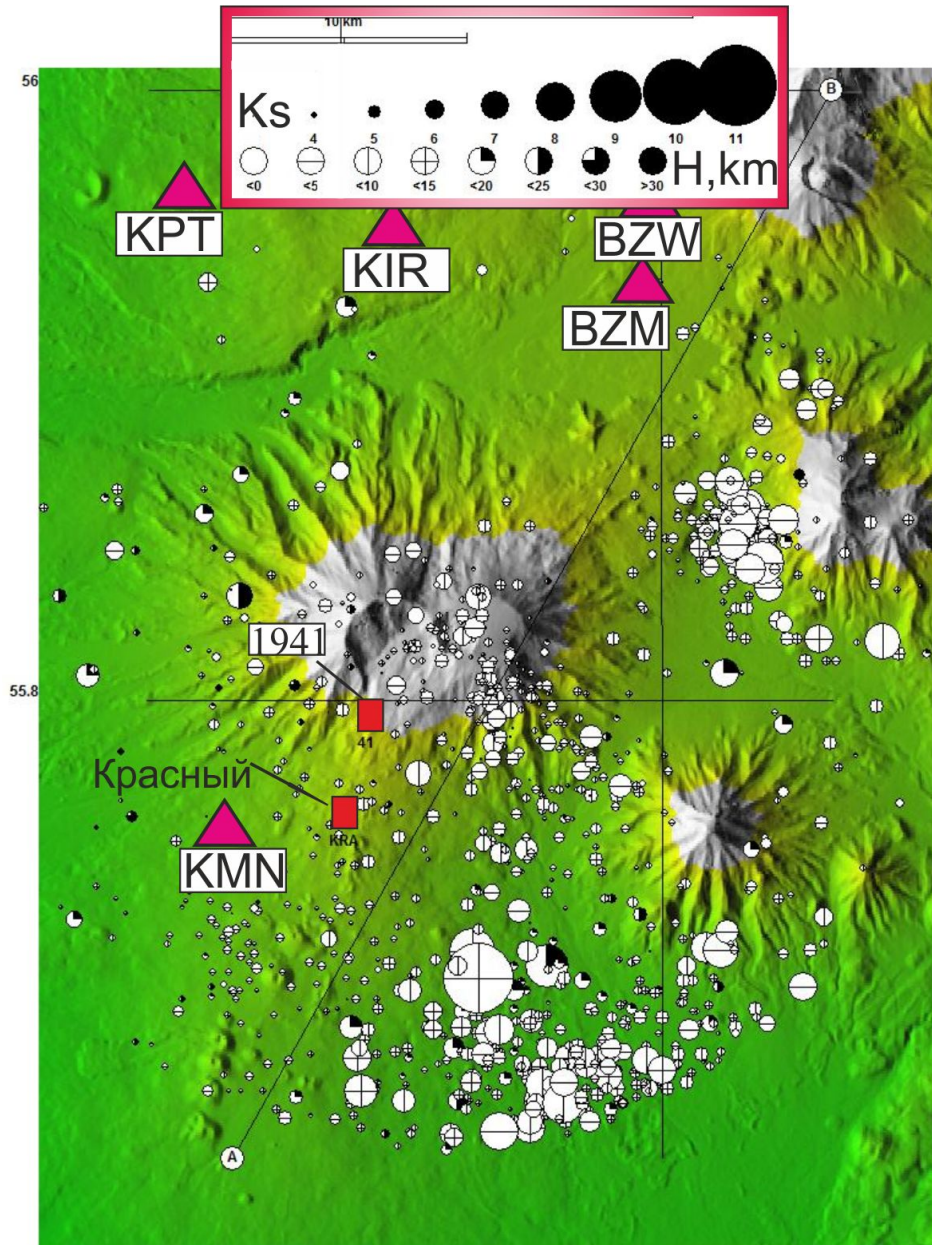


Рис. 8. Сейсмичность в районе вулкана Плоский Толбачик. Период наблюдений 1 января 1999 г. – 31 июля 2012 г. Треугольниками обозначены сейсмические станции, прямоугольниками – положение конусов 1941-го года и конуса Красный.

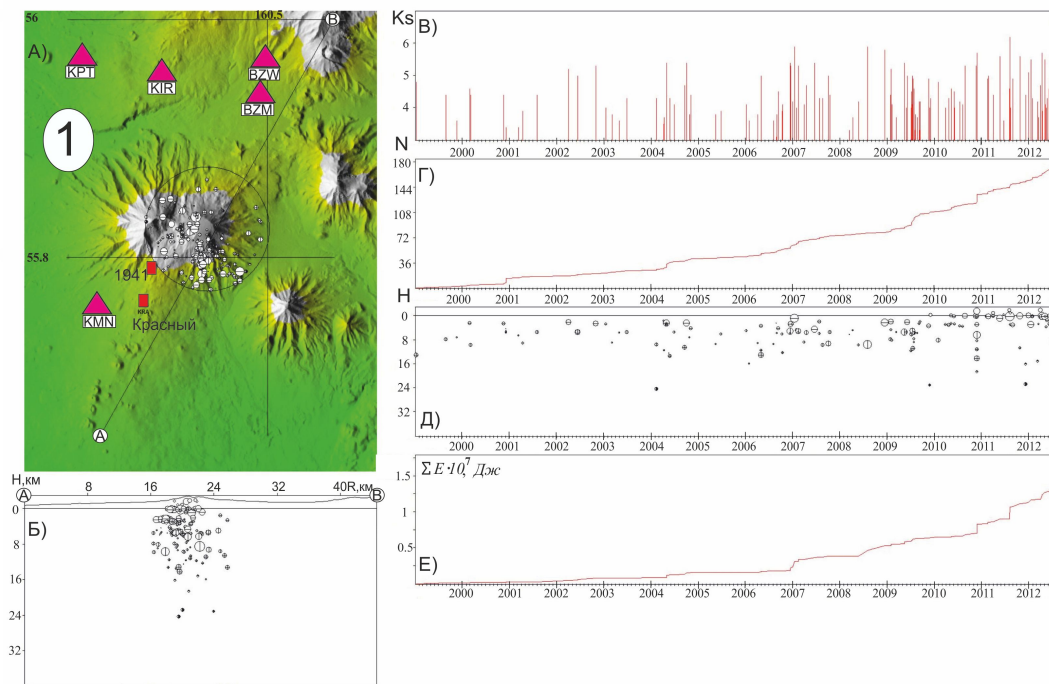


Рис. 9. Сейсмичность в основной (1) области за период 1 января 1999 г. — 31 июля 2012 г. А) Карта эпицентров землетрясений; Б) проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии АВ; В) энергетический класс по *S*-волне; Г) кумулятивное количество землетрясений; Д) глубина гипоцентров, км; Е) кумулятивная энергия, Дж.

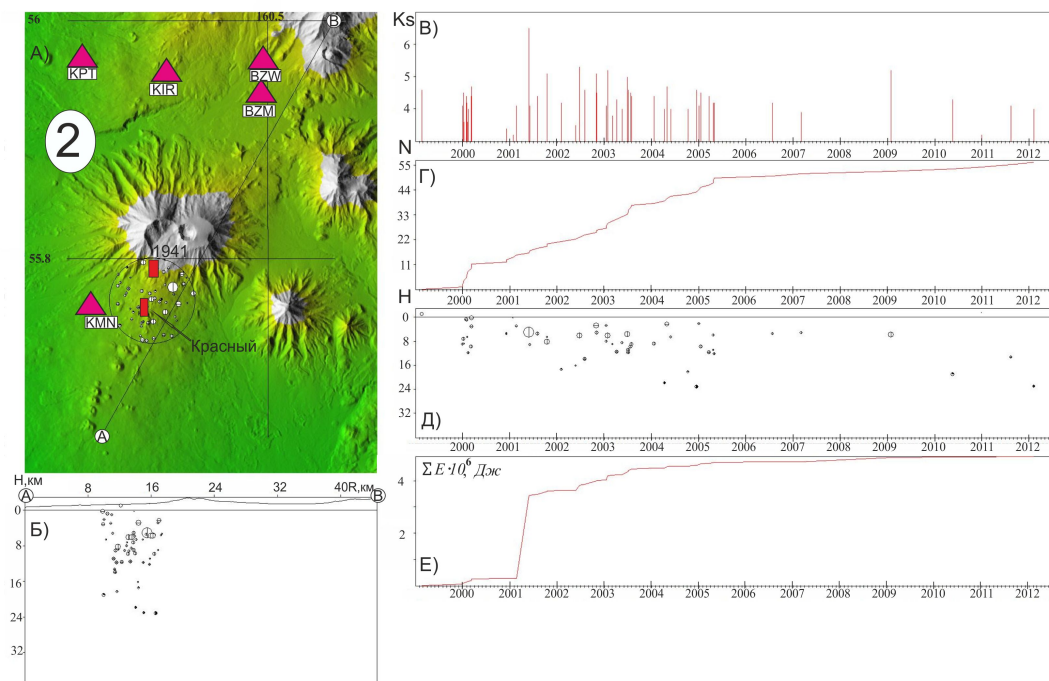


Рис. 10. Сейсмичность в конусной (2) области за период 1 января 1999 г. — 31 июля 2012 г. А) Карта эпицентров землетрясений; Б) проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии АВ; В) энергетический класс по *S*-волне; Г) кумулятивное количество землетрясений; Д) глубина гипоцентров, км; Е) кумулятивная энергия, Дж.

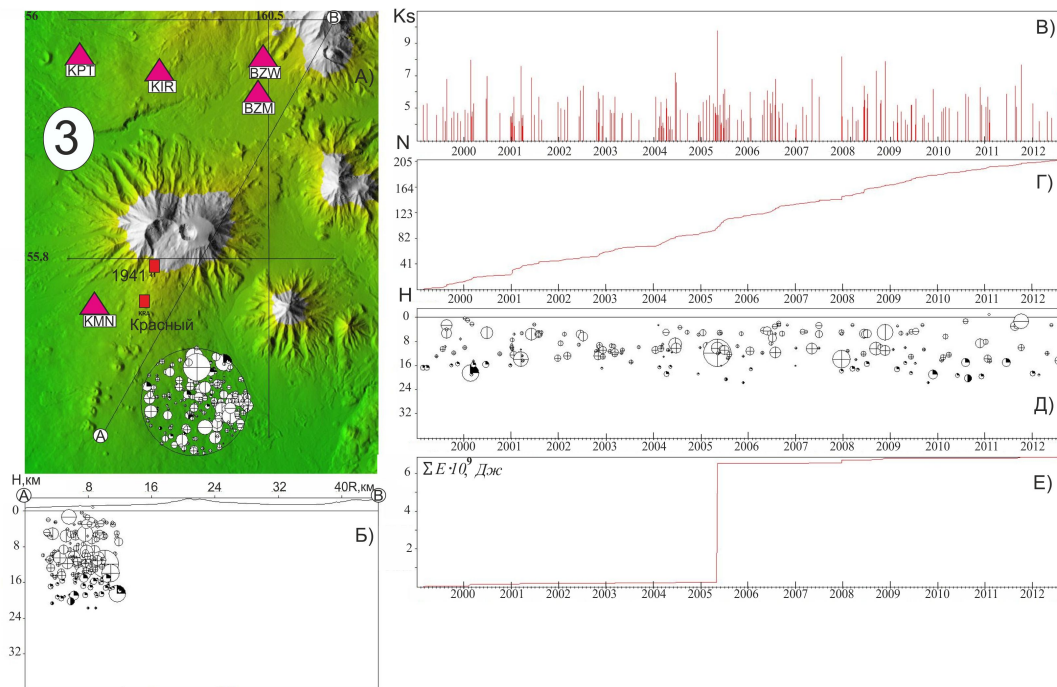


Рис. 11. Сейсмичность в южной (3) области за период 1 января 1999 г. — 31 июля 2012 г. А) Карта эпицентров землетрясений; Б) проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии АВ; В) энергетический класс по S -волне; Г) кумулятивное количество землетрясений; Д) глубина гипоцентров, км; Е) кумулятивная энергия, Дж.

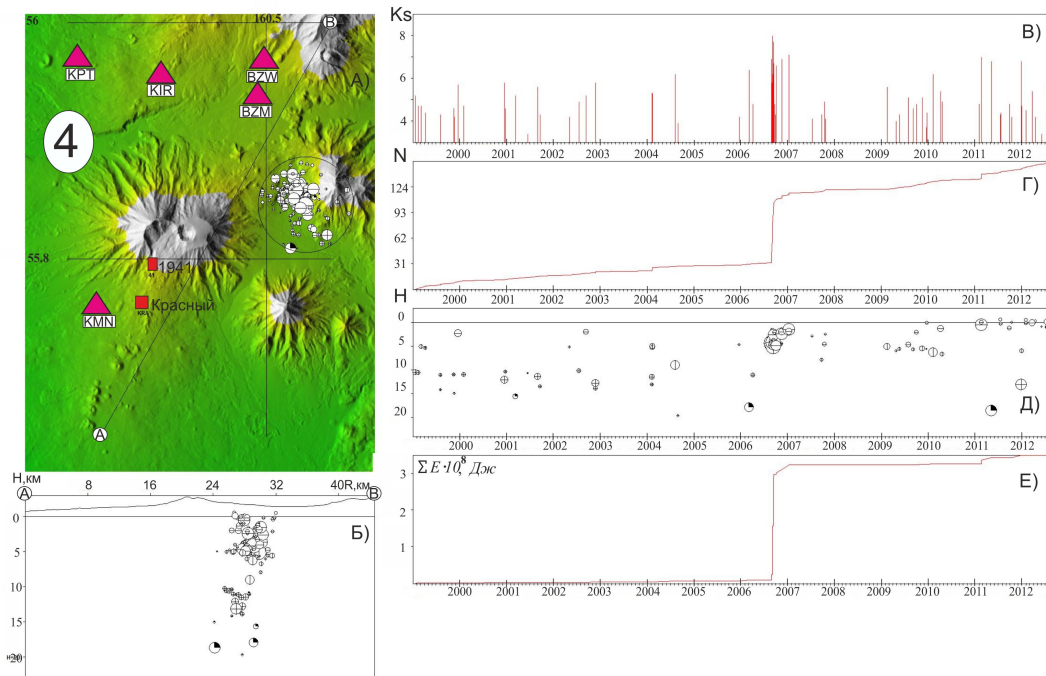


Рис. 12. Сейсмичность в северной (4) области за период 1 января 1999 г. — 31 июля 2012 г. А) Карта эпицентров землетрясений; Б) проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии АВ; В) энергетический класс по S -волне; Г) кумулятивное количество землетрясений; Д) глубина гипоцентров, км; Е) кумулятивная энергия, Дж.

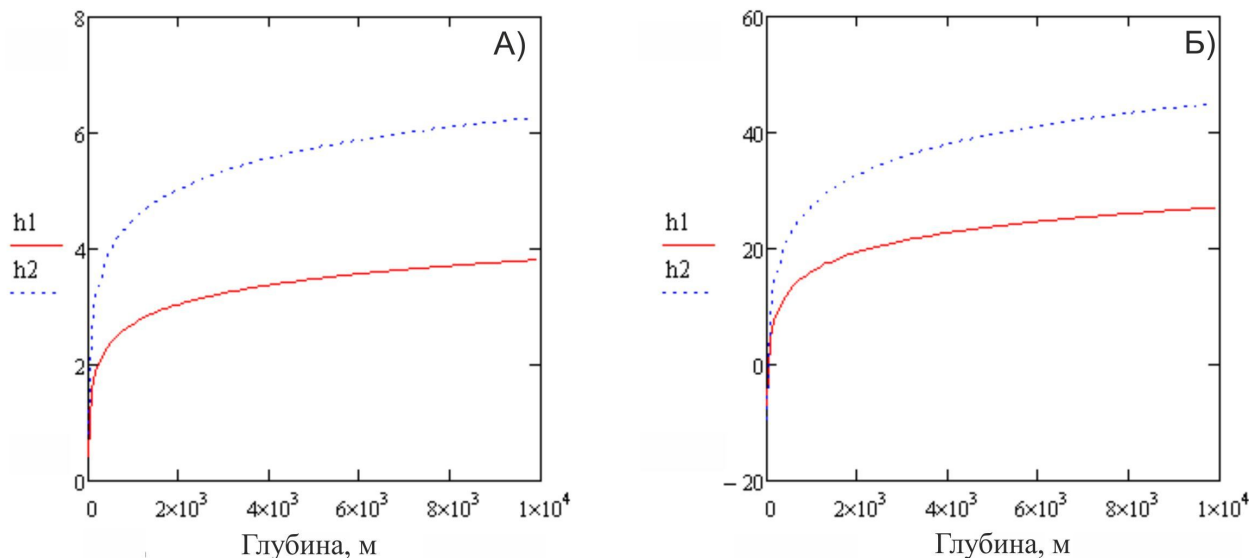


Рис. 13. Увеличение высоты колонны расплава в зависимости от уровня сепарации H_0 . А) h_1 — при $\varphi_0 = 0,12$, $H_0 = 4$ м; h_2 — при $\varphi_0 = 0,215$, $H_0 = 3,57$ м.; Б) h_1 при $\varphi_0 = 0,12$, $H_0 = 40$ м; h_2 при $\varphi_0 = 0,215$, $H_0 = 35,7$ м.

Заключение

В распределении эпицентров землетрясений, связанных с трещинным Толбачинским извержением им. 50-летия ИВиС, выделены четыре зоны: основная — предвещающая извержение и, по-видимому, определяющая область магматического питания; межконусная — характеризующая динамические процессы образования эруптивных центров; южная и северная — вероятно связаны с региональной сейсмической активностью.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка). М.: Наука, 1984. 638 с.
2. Гордеев Е. И., Чебров В. Н., Дрознин Д. В. и др. Сбор, обработка и хранение сейсмологической информации // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004. С. 43–61.
3. Дрознин В. А. Физика вулканического процесса. М.: Наука. 1980. 92 с.
4. Леонов В. Л. Вулканические хребты: морфология, ориентировка, значение для геотермии // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма (материалы Междунар. полевого Курило-Камчатского семинара, 16 июля — 6 августа 2005 г.) / Гл. ред. Рычагов С. Н.. — Петропавловск-Камчатский, «ОТТИСК», 2005. С. 171–180
5. Сеньюков С. Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 279–291.
6. Сеньюков С. Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 96–108.
7. Токарев П. И. Предсказание места и времени начала Большого трещинного Толбачинского извержения в июле 1975 г. // ДАН. 1976. Том. 229. № 2. С. 439–442.
8. Токарев П. И. Прогноз побочного извержения вулкана Ключевской в марте 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 3–8.
9. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
10. Федотов С. А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука 2006, 455 с.