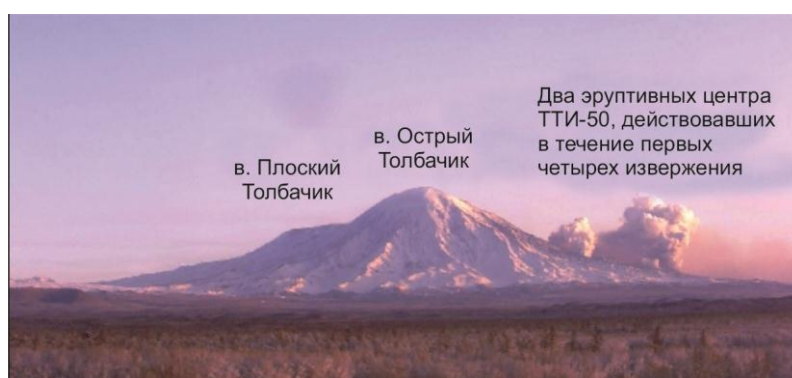


### III.1.2. Анализ сейсмичности, предварявшей Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг.

*Ю.А. Кугаенко, В.А. Салтыков, П.В. Воропаев*

Одним из крупнейших извержений вулканов, произошедших в последние десятилетия на территории России, является грандиозное, преимущественно лавовое, извержение 2012–2013 гг. в Южной части Ключевской группы вулканов на склоне вулкана Плоский Толбачик на Камчатке – новое Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) [*Самойленко и др.*, 2012; *Гордеев и др.*, 2013] (рис. III.6).



**Рис. III.6. Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг.  
им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.**

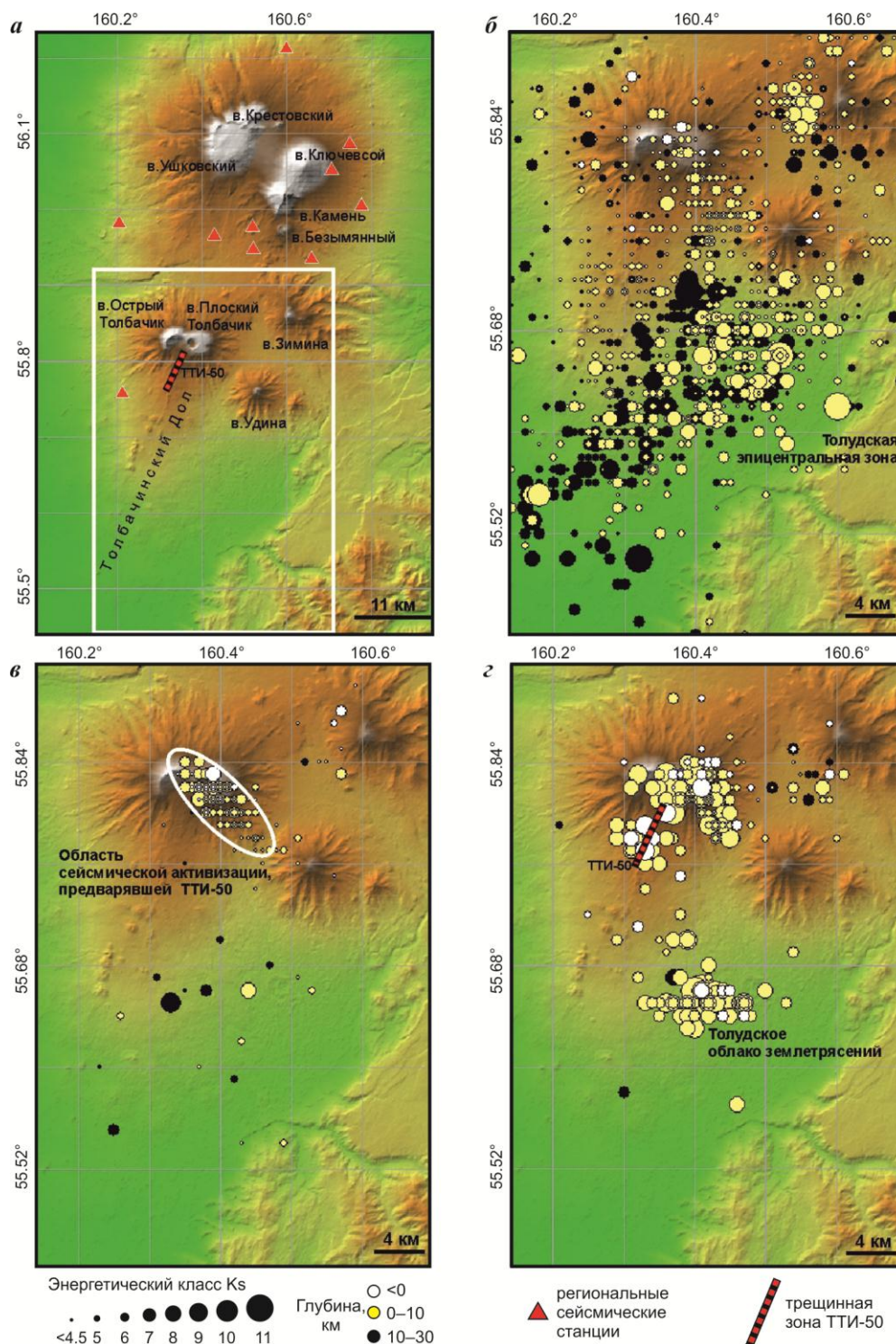
*Видеоданные с пункта наблюдения за вулканами «Козыревск», получаемые КФ ГС РАН в режиме, близком к реальному времени. Съемка 29 ноября 2012 г.*

ТТИ-50 началось 27 ноября 2012 г. в 05<sup>h</sup>15<sup>m</sup> UTC (17<sup>h</sup>15<sup>m</sup> местного времени) с образования поверхностного разлома субмеридионального простирания, вдоль которого впоследствии сосредоточились эруптивные центры извержения. Длина разломной зоны составила около 6 км в диапазоне высот от 1500 до 2200 м. Начало извержения было оперативно идентифицировано по сейсмическим данным в Камчатском региональном информационно-обрабатывающем центре ГС РАН [*Сенюков и др.*, 2013]. Также по сейсмическим данным установлено, что фонтанирование лавы и излияние лавовых потоков началось примерно через три часа после начала формирования разломной зоны [*Гордеев и др.*, 2013].

Достоверно известно несколько исторических трещинных извержений в Толбачинской вулканической зоне [*Большое...*, 1984; *Действующие...*, 1991; *Новейший...*, 2005]: описанное С.П. Крашенинниковым извержение 1740 г., прорыв 1941 г., Большое Трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 гг. (БТТИ) и ТТИ-50.

В настоящее время детально исследованы аномалии сейсмического режима, предварявшие БТТИ [*Большое...*, 1984] и ТТИ-50 [*Салтыков и др.*, 2012]. Интенсивная сейсмическая подготовка ( $K_S=9-11$ , где  $K_S$  – энергетический класс по [*Федотов*, 1972]), которая фиксировалась в течение девяти суток перед образованием северного прорыва БТТИ, позволила сделать успешный прогноз этого извержения по сейсмическим данным. Перед ТТИ-50 наблюдалась другая ситуация – очевидная сейсмическая активизация стала проявляться лишь в последние сутки перед прорывом, а относительно сильные землетрясения с  $K_S=10-11$  перед ТТИ-50 не наблюдались вообще.

Однако технические характеристики современной системы мониторинга сейсмической активности Ключевской группы вулканов (рис. III.7 а) позволили исследовать процессы подготовки ТТИ-50 на более низком, чем в 1975 г., энергетическом уровне и выявить в сейсмическом процессе скрытые особенности, предворявшие это извержение.

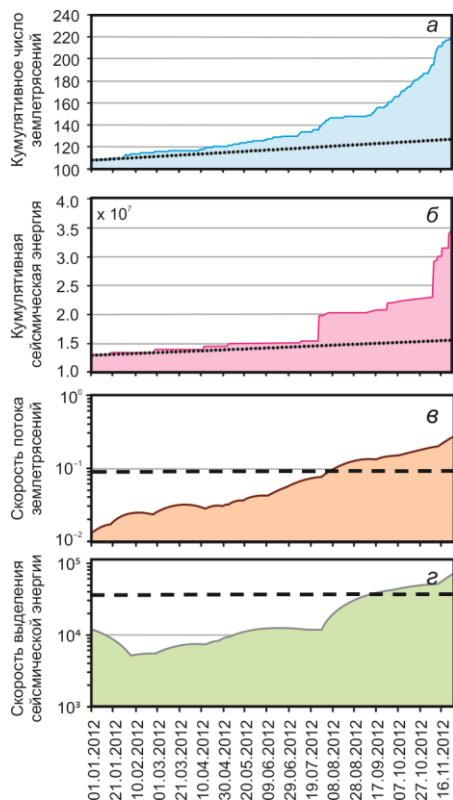


**Рис. III.7. Стационарная сеть сейсмологических наблюдений и сейсмичность в районе ТТИ-50:**

**а** – сеть региональных сейсмических станций в районе Ключевской группы вулканов;  
**б–г** – эпицентры землетрясений для области, выделенной белым прямоугольником на рис. (а): январь 1999 г. – июнь 2012 г. (б); июль 2012 г. – 26 ноября 2012 г. (в); 27 ноября 2012 г. – 31 декабря 2012 г. (г)

Для обнаружения возможных аномалий, предшествовавших ТТИ-50, проведен анализ сейсмичности района извержения по каталогу Ключевской группы вулканов 1999–2012 гг. Уровень надежной регистрации землетрясений для района «вулкан Плоский Толбачик – Толбачинский Дол» для каталога 1999–2012 гг. составляет  $K_{\text{пред}}=4.5$ . Рассматривались сейсмические события, зарегистрированные в радиусе 10 км от вершины вулкана Плоский Толбачик в диапазоне глубин до 30 км. Подавляющее большинство этих землетрясений (более 80%) зафиксированы на глубине до 5 км; максимальные энергетические классы  $K_S=7-9$  отмечены для сейсмических событий 27 ноября 2012 г., которые произошли в течение последних часов перед извержением и связываются с его начальной фазой. При анализе параметров сейсмического процесса учитывались только землетрясения, произошедшие до начала извержения.

С середины 2012 г. наблюдается отклонение от средних за 1999–2011 гг. скорости сейсмического потока и скорости выделения сейсмической энергии в сторону увеличения (рис. III.8 а, б). В июле-августе 2012 г. произошло превышение максимальной за 1999–2011 гг. величины скорости сейсмического потока и скорости выделения сейсмической энергии во временных окнах 1–6 месяцев (рис. III.8 в, г). Это свидетельствует об активизации сейсмичности, пространственно связанной с областью малоглубинного магматического очага вулкана Плоский Толбачик [Федотов и др., 2011].

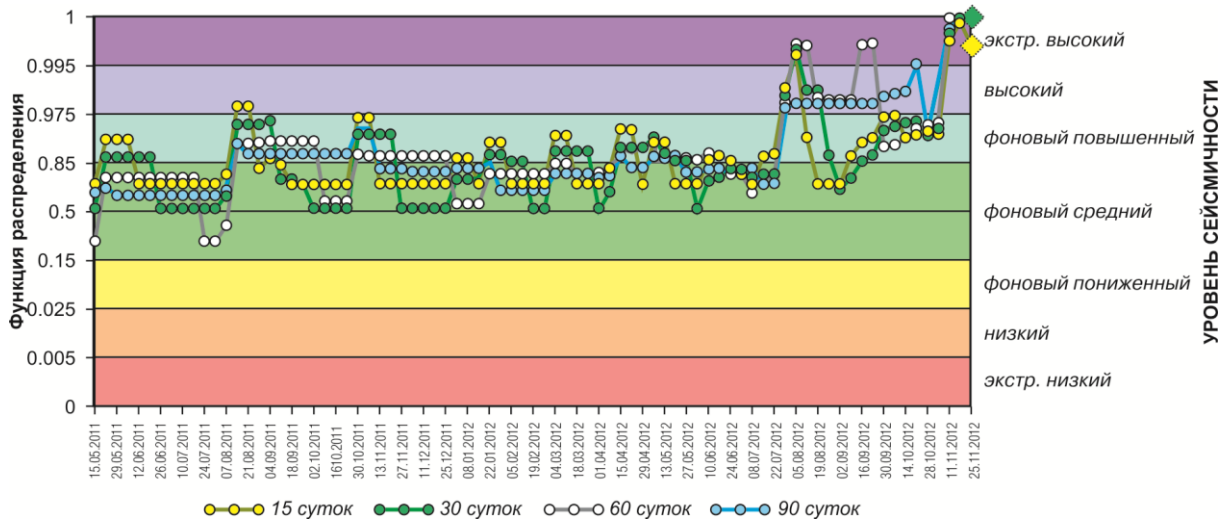


**Рис. III.8. Аномалия сейсмического режима перед началом ТТИ-50 в параметрах сейсмичности:**  
 а – кумулятивный график числа землетрясений, б – кумулятивный график выделявшейся сейсмической энергии (точные пунктиры на рис. III.7 а, б моделируют накопление числа землетрясений и выделившейся энергии со средней скоростью, определенной за интервал 1999–2011 гг.);  
 в – скорость сейсмического потока для временного окна 120 суток, штриховой пунктир – максимальная скорость сейсмического потока, наблюдавшаяся по данным 1999–2011 гг. во временном окне 120 суток;  
 г – скорость выделения сейсмической энергии для временного окна 120 суток, штриховой пунктир – максимальная скорость выделения сейсмической энергии, наблюдавшаяся по данным 1999–2011 гг. во временном окне 120 суток

Для того чтобы статистически оценить и охарактеризовать выявленную сейсмическую активизацию, использована шкала уровня сейсмичности СОУС'09, которая описана в работе [Салтыков, 2011] и использована ранее для оценки региональной сейсмичности (см. разделы II.1 и II.2). Шкала СОУС'09 привязана к статистической функции распределения сейсмической энергии как к параметру, характеризующему уровень сейсмичности заданного пространственного объекта в определенный временной интервал. В работе [Салтыков и др., 2012] подробно представлена функция распределения выделившейся сейсмической энергии для области радиусом 10 км от вершины вулкана Плоский Толбачик до глубины 30 км (по каталогу Ключевской группы вулканов). Низкий и экстремально низкий уровни сейсмичности для рассматриваемого массива данных



статистически не определены. Фоновый пониженный уровень имеет смысл рассматривать во временных окнах более 100 суток, а фоновый средний – более 10 суток. Эти ограничения статистических оценок связаны с тем, что имеются продолжительные временные интервалы, в которых не были зарегистрированы землетрясения представительного класса. Для временного окна 10 суток уровень сейсмичности является фоновым средним для выделившейся сейсмической энергии до  $\Sigma E \sim 4.0 \cdot 10^4 \text{ Дж}$ , фоновым повышенным – в диапазоне  $\Sigma E \sim 4.0 \cdot 10^4 - 6.3 \cdot 10^5 \text{ Дж}$ . Временной ход уровня сейсмичности вулкана Плоский Толбачик в течение полутора лет перед ТТИ-50 представлен на рис. III.9. Расчеты проводились с временным шагом 7 суток, каждая точка на графике совпадает с окончанием соответствующего временного окна. Выявлен статистически значимый переход уровня сейсмичности с фонового на высокий, а затем на экстремально высокий уровень, что соответствует многократному увеличению числа землетрясений и выделившейся сейсмической энергии в июле–ноябре 2012 года. Последние три недели перед трещинным прорывом 2012 г. сейсмичность анализируемого сейсмоактивного объема находилась на экстремально высоком уровне.



**Рис. III.9. Временной ход уровня сейсмичности в различных временных окнах для области радиусом 10 км от вершины вулкана Плоский Толбачик до глубины 30 км по каталогу Ключевской группы вулканов**

Сейсмическую аномалию (активизацию) в районе вулкана Плоский Толбачик перед ТТИ-50 можно разделить на несколько этапов:

- июль–октябрь 2012 г., сейсмическая активизация низкого энергетического уровня ( $K_S=4-6$ ) длительностью около четырех месяцев, которая характеризуется возмущениями уровня сейсмичности до высокого – экстремально высокого уровня, значительным увеличением числа зарегистрированных землетрясений, ростом их выделившейся энергии и ускорением сейсмического потока; на карте эпицентров активизация охватывает постройку вулкана Плоский Толбачик;

- ноябрь 2012 г., устойчивый выход уровня сейсмичности на экстремально высокий уровень при сохранении преобладающих классов землетрясений в диапазоне  $K_S=4-6$ ; активизация по-прежнему охватывает постройку вулкана Плоский Толбачик;

- последние часы перед началом извержения, когда стали регистрироваться более сильные землетрясения ( $K_S=7-9$ ). На этом этапе произошло изменение распределения эпицентров (рис. III.7 в, г): сформировались две пространственно разнесенные группы землетрясений, первая из которых осталась связанной с вулканом Плоский Толбачик, а вторая образовалась в зоне начавшегося ТТИ-50.

Первый из этапов аномалии является среднесрочным предвестником извержения, второй и третий этапы – его краткосрочные (длительностью менее одного месяца) предвестники.

Важным событием, связанным с началом ТТИ-50, является последовательность землетрясений из района так называемой Толудской эпицентральной зоны (ТЭС), рис. III.7 б, г. ТЭС была выявлена ранее в ходе исследований сейсмичности БТТИ, ее сейсмическая активность в 1975 г. связывается с оттоком базальтов на малых глубинах из-под вулкана Плоский Толбачик [Большое..., 1984]. В период с 30 ноября по 7 декабря 2012 г. в ТЭС было локализовано около 70 сейсмических событий с  $K_S=5.2-11.3$ ,  $\Sigma E \sim 2.1 \cdot 10^{11}$  Дж. Три наиболее сильных землетрясения с  $K_S=11.3$ ,  $K_S=9.6$  и  $K_S=10.0$  произошли 30 ноября 2012 г. в течение около двух часов в диапазоне глубин 4.5–6.5 км. Последовавший за ними сейсмический процесс шел с затуханием и в основном закончился 5–6 декабря 2012 года. В целом Толудское облако землетрясений (ТОЗ) может рассматриваться как группа из трех указанных выше наиболее сильных событий, предварявшихся единичными форшоками, и афтершокового процесса. Землетрясение с  $K_S=11.3$  ( $M_L=4.9$ ,  $M_C=5.4$ ), которое произошло 30 ноября 2012 г. в 11<sup>h</sup>00<sup>m</sup> на глубине 6.5 км, входит в число пяти сильнейших сейсмических событий с  $K_S > 11.0$ , зарегистрированных на глубине до 10 км под Ключевской группой вулканов за годы детальных сейсмологических наблюдений (1961–2012 гг.). В целом энергия ТОЗ в ~50 раз превышает выделившуюся в 2012 г. сейсмическую энергию непосредственно из района вулкана Плоский Толбачик и ТТИ-50. Отметим, что в 1975 г. БТТИ также предварялось землетрясениями с энергетическими характеристиками, сходными с ТОЗ ( $K_S \leq 11.3$ ).

#### **Заключение**

Проведен анализ сейсмичности, предварявшей ТТИ-50. Выявлена статистически значимая аномалия сейсмического режима, которая проявляется в параметрах сейсмичности низкого энергетического уровня (преимущественно  $K_S=4-6$ ) и представляет собой сейсмическую активизацию. Аномалия не имеет аналогов по сейсмическим данным 1999–2012 гг. Ее длительность составляет не менее 4–5 месяцев. В связи с тем, что сейсмическая аномалия располагалась непосредственно под вулканом Плоский Толбачик в диапазоне глубин до 5 км, ее можно связать с активизацией малоглубинного магматического очага этого вулкана.

Выявленная аномалия сейсмического режима разделена (в зависимости от уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 и энергетических классов землетрясений) на три этапа, которые предлагается рассматривать как предвестники извержения.

Рассмотрена необычная пространственно обособленная группа землетрясений, сопровождавшая начало ТТИ-50.