



УДК [551.24+550.34]:551.21

Ю. А. Кугаенко, В. А. Салтыков, Н. Н. Титков, П. В. Воропаев

Камчатский филиал Геофизической службы РАН

Фаза пробуждения перед Трещинным Толбачинским извержением 2012–2013 гг. по сейсмическим и GPS данным

Представлена оценка длительности подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по результатам анализа инструментальных наблюдений. По сейсмическим и GPS данным выявлены синхронные предварающие извержение аномалии деформаций земной коры и сейсмичности длительностью не менее 4 месяцев (август–ноябрь 2012 г.). Сопоставимая длительность сейсмической и деформационной аномалий может свидетельствовать об их общей генетической природе и позволяет отнести их к единому временному масштабу предвестников извержения — среднесрочному.

Фаза пробуждения (*volcanic unrest*) всегда предшествует извержению, но не всегда проявляется одинаково даже на одних и тех же вулканах. Она может иметь как разную длительность, так и разную интенсивность. Термин *volcanic unrest* был введен в науки о Земле в начале 90-х годов XX века в качестве одного из геоиндикаторов, описывающих опасные изменения окружающей среды (в данном случае это относится к вулканам). Под геоиндикаторами подразумевались количественно определяемые параметры, характеризующие динамику в ходе геологических процессов. Введение таких параметров имело целью создание автоматизированной системы оценки природных опасностей. В последние годы вновь повысился интерес к геоиндикатору *volcanic unrest*, который рассматривается как отклонение от обычного, фонового, поведения вулкана [11, 12]. *Unrest* означает *нестабильность, возмущение, беспорядки, аномальное поведение*. Индикаторами *volcanic unrest* обычно выступают активизация сейсмичности, аномалии деформации земной коры, изменения газового состава фумарол и цвета кратерных озёр, появление новых термоаномалий на вулканах и пр.

По данным исследования [12] 64% различных зафиксированных на вулканах аномалий, рассматриваемых как *volcanic unrest*, заканчиваются извержениями.

В случае пробуждения вулкана обнаруженные в ходе *unrest*-фазы аномальные явления могут, с одной стороны, рассматриваться как предвестники извержения, а с другой — как источник информации для разработки моделей и сценариев активизаций данного вулкана и его аналогов в других районах мира.

Для того, чтобы оценить длительность подготовки (*unrest*-фазы) Трещинного Толбачинского извержения, которое началось в южной части Ключевской группы вулканов на Камчатке 27 ноября 2012 г.

и продолжалось около 9 месяцев [2, 10, 7], были проанализированы предварающие это извержение смещения земной поверхности и сейсмичность.

Так как это извержение было названо Трещинным Толбачинским извержением 2012–2013 гг. им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, обычно для его обозначения употребляется аббревиатура ТТИ-50 [2].

Сеть инструментальных наблюдений на Ключевской группе вулканов представлена на рис. 1. Она неравномерна: в её южной части (южнее вулканов Острый и Плоский Толбачик) расположена лишь одна региональная сейсмическая станция, а GPS-пункты отсутствуют. Сеть GPS располагается по отношению к зоне ТТИ-50 в северном секторе с углом примерно 90°. В 2012 г. состав сети входили три опорных пункта в посёлках Ключи, Козыревск и Майское на расстоянии ~ 50–60 км от ТТИ и группа из пяти пунктов в окрестности вулкана Безымянный, удалённых от ТТИ-50 на расстояние ~ 20–25 км. На последних зарегистрированы максимальные перемещения, предварающие и сопровождавшие ТТИ-50.

Анализ сейсмичности был ориентирован на сопоставление среднесрочных параметров с их «текущими» (2012 г.) значениями. Если рассматриваемый параметр выходил за пределы своего среднесрочного тренда (превышал его), ситуация рассматривалась как активизация сейсмичности (рис. 2). Сейсмическая аномалия перед ТТИ-50 представляет собой статистически значимую сейсмическую активизацию низкого энергетического уровня (преимущественно $K_S = 4 - 6$) под постройкой вулкана Плоский Толбачик на глубине до 5 км [4, 6]. Сейсмичность развивалась с ускорением и уменьшением глубины, эта тенденция прослеживается на рис. 2в уже с 2010 г. В 2012 г. наблюдалось отклонение от средних за 1999–2011 гг. скорости сейсмического потока и скорости выделения сей-

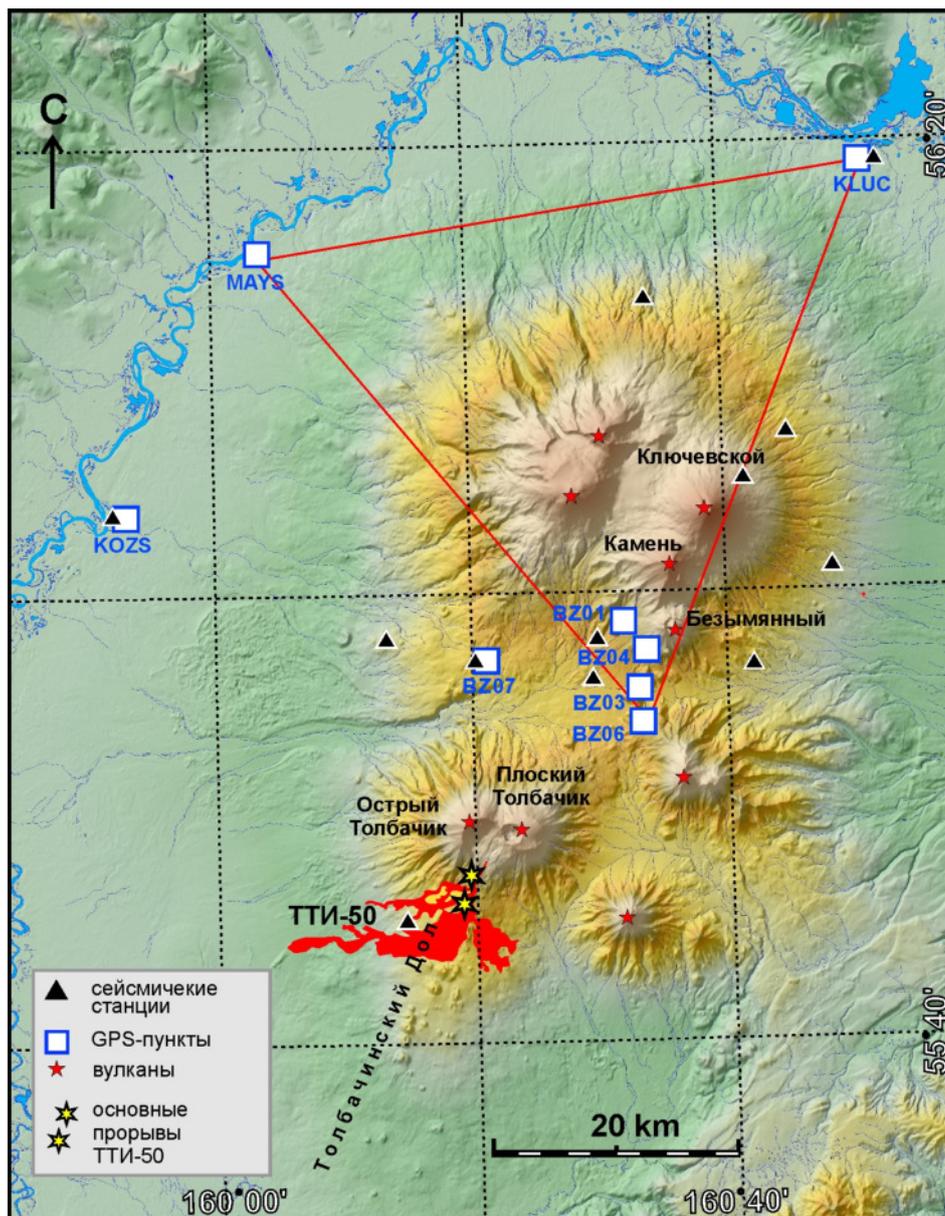


Рис. 1. Сети сейсмических и GPS станций в районе Ключевской группы вулканов перед началом ТТИ-50. Треугольником KLUC-BZ06-MAYS отмечена область определения тензоров горизонтальных деформаций

сической энергии в сторону увеличения (рис. 2а, 2б). Согласно рис. 2а, превышение средних значений параметров началось ещё весной, но наиболее уверенно аномалия проявилась в параметрах сейсмического режима в августе-ноябре 2012 г. Последние три недели перед ТТИ-50 сейсмичность находилась на *экстремально высоком* уровне по шкале СО-УС'09 [5] (рис. 2г).

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

- июль-октябрь 2012 г.: статистически значимая сейсмическая активизация низкого энергетического уровня ($K_S = 4 - 6$) длительностью ~ 4 месяцев, которая характеризуется возмущениями уровня сейсмичности до *высокого* – *экстремально вы-*

сокого уровня, значительным увеличением числа зарегистрированных землетрясений, ростом их выделявшейся энергии и ускорением сейсмического потока; на карте эпицентров активизация охватывает постройку вулкана Плоский Толбачик;

- ноябрь 2012 г. (последние три недели перед извержением): 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 наиболее сильные землетрясения ($K_S = 7 - 9$); на этом этапе произошло изменение распределения эпицентров: сформировались две пространственно разнесённые группы

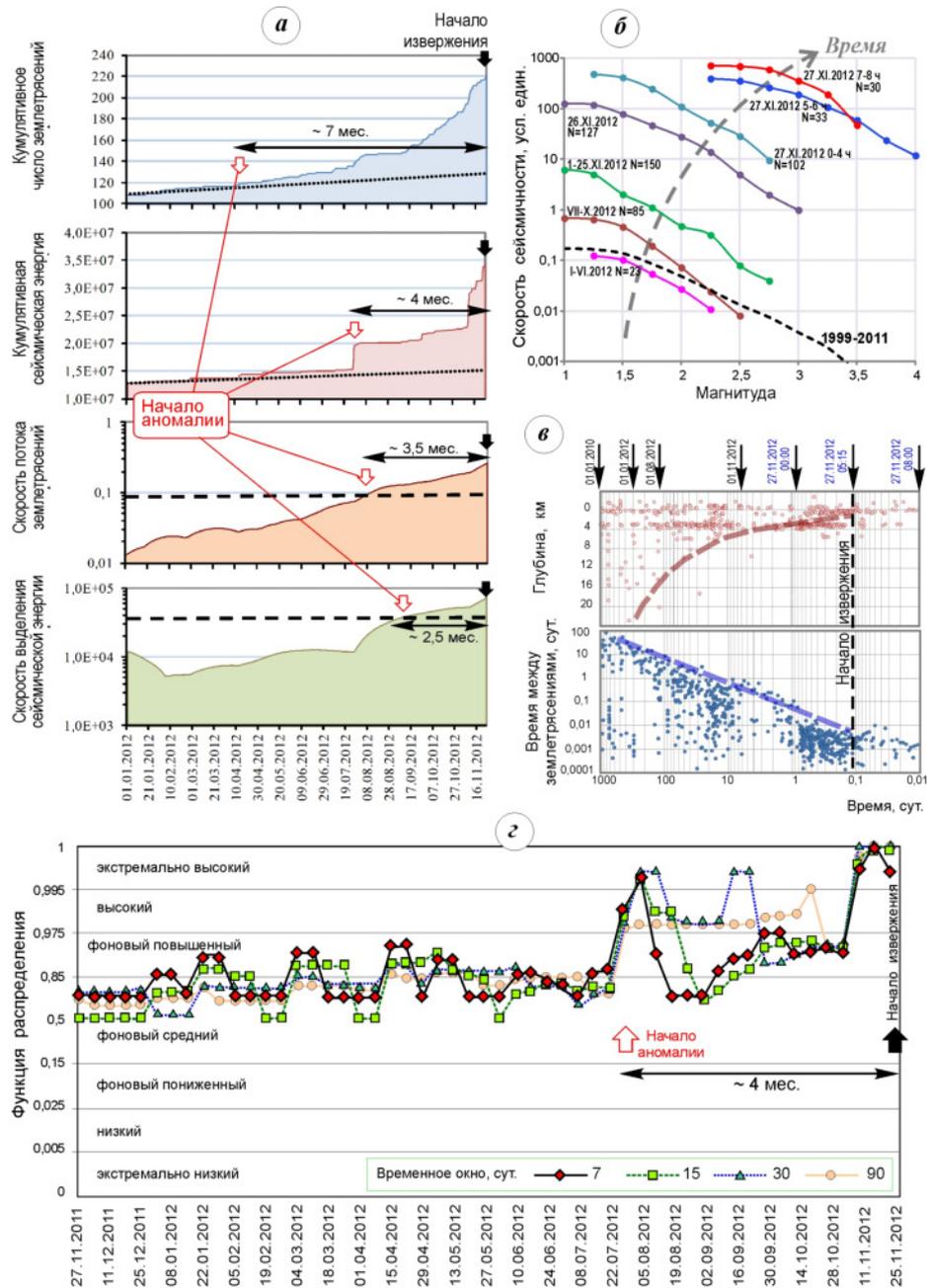


Рис. 2. Пробуждение вулкана (*volcanic unrest*) в параметрах сейсмического режима перед ТТИ-50. а – активизация сейсмичности в параметрах сейсмического потока и выделившейся сейсмической энергии, пунктирная линия соответствует среднеголетнему поведению параметра; б – кумулятивные графики повторяемости землетрясений в различных временных промежутках, предшествовавших извержению, пунктирная линия соответствует среднеголетнему поведению параметра, N – число землетрясений в указанном интервале времени; в – развитие сейсмичности с уменьшением глубины и сокращением времени между соседними событиями, пунктирной линией отмечена наблюдаемая тенденция; г – временной ход уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 [5] в различных временных окнах

землетрясений, первая из которых осталась связанной с вулканом Плоский Толбачик, а вторая образовалась в зоне начавшегося ТТИ-50.

В работе [3] представлен сценарий подготовки ТТИ-50, и указанные периоды сейсмической активизации связываются с динамикой магматических источников извержения. Предполагается, что

за несколько месяцев до ТТИ-50 стала наблюдаться активизация глубинного магмоподводящего разлома. Сейсмичность последних трёх недель перед началом извержения связывается авторами указанной публикации с образованием и пополнением приповерхностных магматических очагов под вулканом Плоский Толбачик на глубинах в первые км

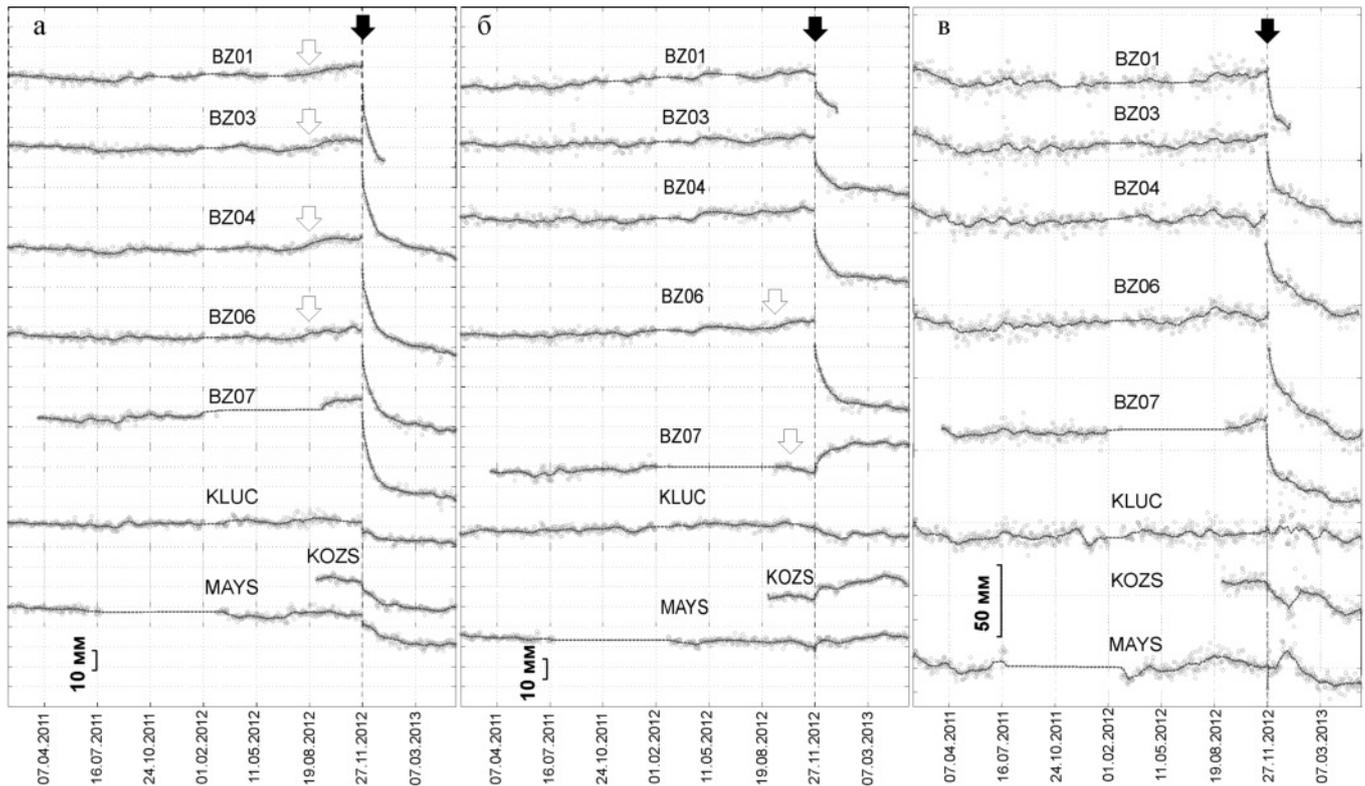


Рис. 3. Временные ряды смещений GPS пунктов, сглаженные скользящим средним с временным окном шириной 20 дней: по горизонтальным компонентам север (а), восток (б) и вертикальной компоненте (в). Долговременные тренды удалены. Сглаживание производилось отдельно для двух интервалов времени: до и после начала извержения. Момент начала извержения отмечен чёрной стрелкой. Светлой стрелкой отмечено начало аномальных перемещений, предвсравявших извержение. Названия GPS пунктов соответствуют схеме на рис. 1.

от поверхности, а последние часы перед извержением — с подъёмом магмы в вулканический канал Плоского Толбачика и формированием пластовых магматических внедрений непосредственно в разрастающейся постройке стратовулкана, в результате чего произошёл боковой разрыв с выходом магмы на поверхность и началось ТТИ-50.

Таким образом, выделенные нами этапы сейсмической активизации перед ТТИ-50 имеют обоснованную физическую природу. Первый из этапов является среднесрочным предвестником извержения. Второй и третий этапы — его краткосрочные (длительностью менее 1 месяца) предвестники.

Деформационные аномалии проявились в перемещении центральной части Ключевской группы вулканов (рис. 3). На рядах горизонтальных перемещений ближайших к ТТИ-50 GPS пунктов BZ01, BZ03, BZ04, BZ06, BZ07 видна аномалия, проявившаяся примерно за 4 месяца до начала извержения (для более удалённых пунктов KLUC, KOZS и MAYS этот эффект выявить не удалось). В августе 2012 г. пункты BZ01, BZ03, BZ04, BZ06, BZ07 начали смещаться от зоны ТТИ-50. Начало аномалии приходится на середину августа 2012 г. Учитывая, что каждая точка на графике является результатом осреднения во временном окне за предыдущие 20 суток, мы можем утверждать,

что длительность аномалии перед ТТИ-50 достигает ~4 месяцев. К началу активной фазы ТТИ-50 смещения достигли сантиметрового уровня.

Рассчитанные для этого периода (август-ноябрь 2012 г.) относительные деформации показали сжатие в радиальном по отношению к извержению направлении и растяжение в тангенциальном (рис. 4). Их величины достигали к началу ТТИ ~10–7. Детали обработки GPS данных для выделения аномальных перемещений и деформаций перед ТТИ-50 приведены в работе [4].

Таким образом, по сейсмическим и GPS данным выявлены синхронные предвсравявшие извержение аномалии деформаций земной коры и сейсмичности длительностью не менее 4 месяцев (август-ноябрь 2012 г.). На рис. 5 сопоставление сейсмических и GPS параметров перед ТТИ-50 представлено на едином графике. В последние 2–3 недели перед извержением среднесрочные (1999–2011 гг.) скорости потока сейсмических событий и сейсмической энергии были превышены ~ в 40 раз.

В вышедших после начала ТТИ-50 публикациях неоднократно встречается сопоставление длительности сейсмической подготовки, предвсравявшей трещинные извержения 1975–1976 гг. и 2012–2013 гг. Отметим, что 1975 г. был зафиксирован лишь завершающий (очень интенсивный, но непродолжи-

тельный, ~ 9 суток) этап фазы пробуждения перед началом извержения Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения, которое тем не менее было успешно предсказано по сейсмическим данным [1]. Следует учитывать, что

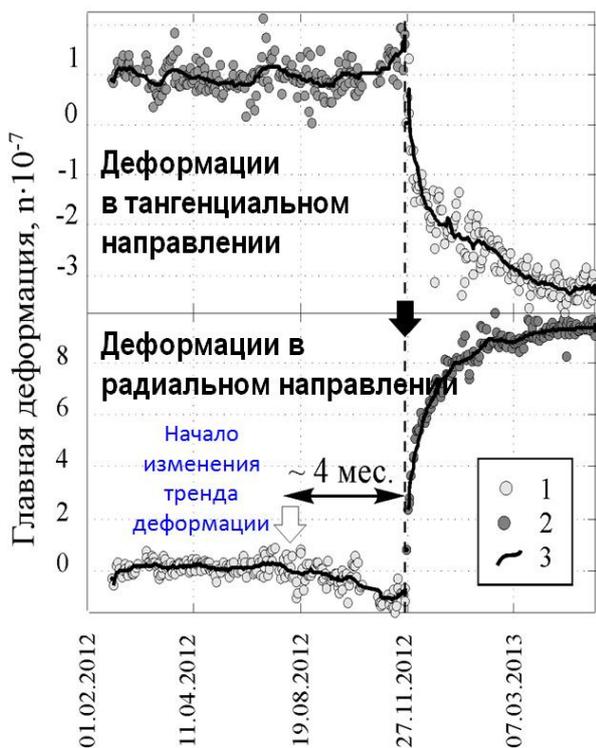


Рис. 4. Временные ряды главных относительных деформаций треугольника KLUC-BZ06-MAYS, представленного на рис. 1, в соответствии с их направлением на извержение. Верхний график — главные деформации в тангенциальном направлении. Нижний график — главные деформации в радиальном направлении.

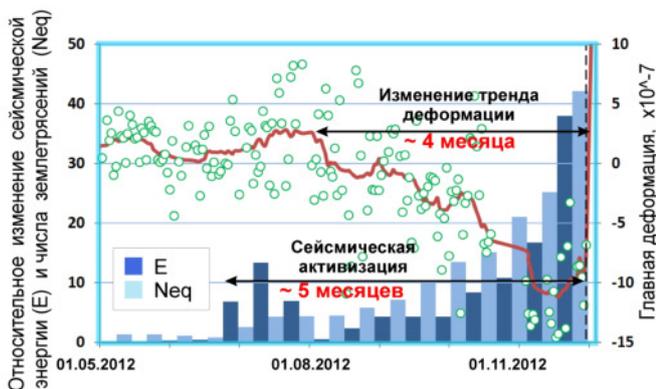


Рис. 5. Сопоставление сейсмических и GPS данных перед ТТИ-50 (май–ноябрь 2012 г.). Представлены главные деформации треугольника KLUC-BZ06-MAYS и параметры сейсмичности (увеличение числа землетрясений N_{eq} и выделившейся сейсмической энергии E относительно среднееголетнего значения во временном окне 1 месяц с шагом 2 недели).

вся *unrest*-фаза в 1975 г. корректно выявлена быть не могла, так как деформационные наблюдения в этом районе не проводились, а ближайшая сейсмическая станция была удалена от места извержения почти на 50 км. Технические характеристики современной системы мониторинга сейсмической активности Ключевской группы вулканов позволили исследовать процессы подготовки ТТИ-50 на более низком, чем в 1975 г., энергетическом уровне [8, 9]. Так в 1975 г. уровень надежной регистрации землетрясений (уровень представительности каталога) для района «вулкан Плоский Толбачик — Толбачинский Дол» можно оценить только как $K_{пред} = 8,5$, а в 1999–2012 гг. указанный показатель значительно улучшился и составляет $K_{пред} = 4,0 - 4,5$ (рис. 6).

Перед ТТИ-50 имеющаяся сеть деформационного и сейсмического мониторинга позволила впервые в России выявить длительные синхронные предварявшие извержение аномалии деформаций земной коры и параметров сейсмического режима, связанные с пробуждением вулкана. Также впервые в России в 2012–2013 гг. по GPS данным получены непрерывные ряды записей деформаций земной коры, отражающие подготовку и процесс масштабного вулканического извержения.

С уверенностью можно утверждать, что выявленная по инструментальным данным *unrest*-фаза перед ТТИ-50 длилась не менее 4 месяцев. Сопоставимая длительность сейсмической и деформационной аномалий свидетельствует в пользу их общей генетической природы и позволяет отнести их к единому временному масштабу предвестников ТТИ-50 (согласно принятой терминологии — среднесрочному).

Исследования поддержаны научным проектом РФФИ (грант 13–05–00 117).

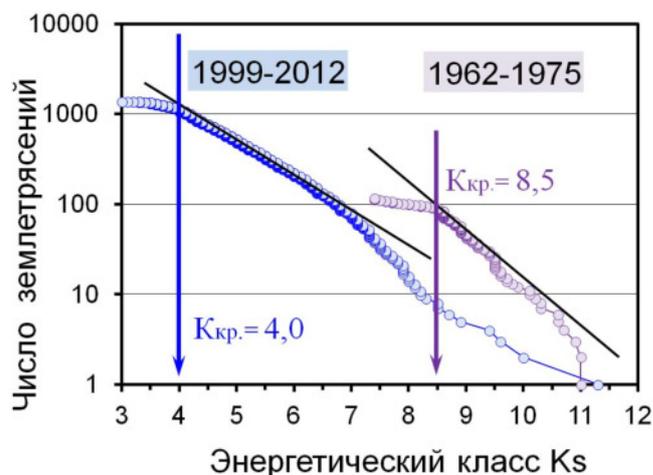


Рис. 6. Кумулятивные графики повторяемости землетрясений для района «вулкан Плоский Толбачик — Толбачинский Дол» за 1962–1975 гг. — по данным регионального каталога, за 1999–2012 гг. — по данным каталога Ключевской группы вулканов.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. 67 с.
2. Гордеев Е. И., Муравьев Я. Д., Самойленко С. Б. и др. Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг. Первые результаты // ДАН. 2013. Том. 452. № 5. С. 562–566.
3. Ермаков В. А., Гонтовая Л. И., Сеньюков С. Л. Тектонические условия и магматические источники нового Толбачинского трещинного извержения (п-ов Камчатка) // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 1. С. 5–33.
4. Кугаенко Ю. А., Титков Н. Н., Салтыков В. А., Воропаев П. В. Анализ подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. в параметрах сейсмичности и деформаций земной коры по данным системы комплексного мониторинга активности вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 3–13.
5. Салтыков В. А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
6. Салтыков В. А., Кугаенко Ю. А., Воропаев П. В. Об аномалии сейсмического режима, предварявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. 2012. № 2. Вып. 20. С. 9–16.
7. Самойленко С. Б., Мельников Д. В., Магуськин М. А., Овсянников А. А. Начало нового трещинного Толбачинского извержения в 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 20–22.
8. Чебров В. Н., Дрознин Д. В., Кугаенко Ю. А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.
9. Чебров В. Н., Дрознин Д. В., Дрознина С. Я. и др. Развитие системы комплексного инструментального мониторинга вулканов Дальневосточного региона // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 4. С. 40–54.
10. Edwards B., Belousov A., Belousova M. et al. Another «Great Tolbachik» Eruption? // EOS, Transactions American Geophysical Union. 2013. V. 94. Is. 21. P. 189–191. DOI: 10.1002/2013EO210002
11. Diefenbach A., Guffanti M., Ewert J. Chronology and references of volcanic eruptions and selected unrest in the United States, 1980–2008. Open-File Report 2009–1118. U.S. Geological Survey. 2009. 85 p.
12. Phillipson G., Sobradelo R., Gottsmann J. Global volcanic unrest in the 21st century: An analysis of the first decade // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 264. P. 183–196.