



УДК 550.34:551.21

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

Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: ku@esd.ru

Особенности сейсмичности Толбачинской вулканической зоны и сейсмическая активизация перед трещинным извержением 2012–2013 гг.

Рассмотрены особенности сейсмичности Толбачинской вулканической зоны: анизотропия проявления мелкофокусной сейсмичности Толбачинского Дола; сейсмический отклик Толудской эпицентральной зоны на повышения вулканической и сейсмической активности; различия сейсмической подготовки перед трещинными извержениями 1975–1976 гг. и 2012–2013 гг.

Введение

К особенностям сейсмичности Толбачинской вулканической зоны относится:

- анизотропия проявления мелкофокусной сейсмической активности Толбачинского Дола, где большинство землетрясений происходит к востоку от основного магмоподводящего разлома;
- сейсмический отклик Толудской эпицентральной зоны на трещинные извержения и повышение сейсмической активности вулкана Плоский Толбачик;
- разнообразие проявлений сейсмической подготовки перед трещинными извержениями Толбачинского Дола (ярким примером этого являются извержения 1975–1976 гг. и 2012–2013 гг.)

Наши представления о сейсмичности исследуемого района базируются на данных Камчатской региональной сети сейсмических станций [10]. Инструментальные наблюдения за сейсмическим режимом на активных вулканах начались на Камчатке в 1946 г., когда в пос. Ключи была открыта первая сейсмическая станция. К началу организации на Камчатке детальных сейсмологических наблюдений (1961–1962 гг.) в районе Ключевской группы вулканов работали три постоянные сейсмические станции, которые в дальнейшем вошли в региональную сеть. В районе Толбачинского Дола первая постоянная сейсмическая станция «Водопадный» была открыта в 1976 г., после БТТИ. В 1991 г. она была заменена на организованную на новом техническом уровне сейсмостанцию станция «Каменистая» (КМН, рис. 2), и регистрация землетрясений перешла в автономный режим с передачей данных по радиоканалу. С 1996 г. обработка цифровых записей землетрясений ведётся на Камчатке в автоматизированном режиме, что позволило значительно улучшить качество получаемого каталога. С 2005–2006 гг. в районе Ключевской группы вулканов функционирует 12 постоянных сейсмических станций. Уровень надёжной регистрации землетрясений Толбачинского

Дола составляет $K_S = 4,2 \div 4,5$ (по энергетической классификации [8]), или $M_L = 1,4 \div 1,5$.

Анизотропия проявления мелкофокусной сейсмической активности Толбачинского Дола

В целом сейсмическая обстановка в районе Толбачинского Дола за период инструментальных наблюдений (исключая Большое трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 гг. (БТТИ)) была спокойной. Максимальный класс регистрируемых событий не превышал $K_S = 11,0$ ($M_L = 4,8$).

На рис. 1 приведена карта эпицентров землетрясений южной части Ключевской группы вулканов, включая Толбачинскую региональную зону шлаковых конусов, которые были зарегистрированы Камчатской региональной сетью сейсмических станций в 2001–2011 гг. на глубине до 30 км. Рассмотрим проекцию очагов землетрясений на вертикальную плоскость, проходящую вкост осевого магмоподводящего разлома и полосы наиболее молодых шлаковых конусов, образовавшихся в течение последних 2 тыс. лет. Отмечается интересная особенность пространственного распределения мелкофокусных сейсмических событий Толбачинского Дола 2001–2011 гг.: группирование землетрясений преимущественно в его восточной части и резкая граница облака гипоцентров, совпадающая с осевой разломной структурой Дола. Облако землетрясений задевает магмоподводящий разлом лишь своим южным краем, в районе ЮП БТТИ. Наблюдается заглупление очагов землетрясений вдоль линии АБ в направлении с востока на запад (рис. 1-б). Природа выявленного эффекта требует дополнительных исследований.

Разнообразие проявлений сейсмической подготовки перед трещинными извержениями Толбачинского Дола

Этот эффект инструментально зафиксирован для двух последних извержений Толбачинского Дола:

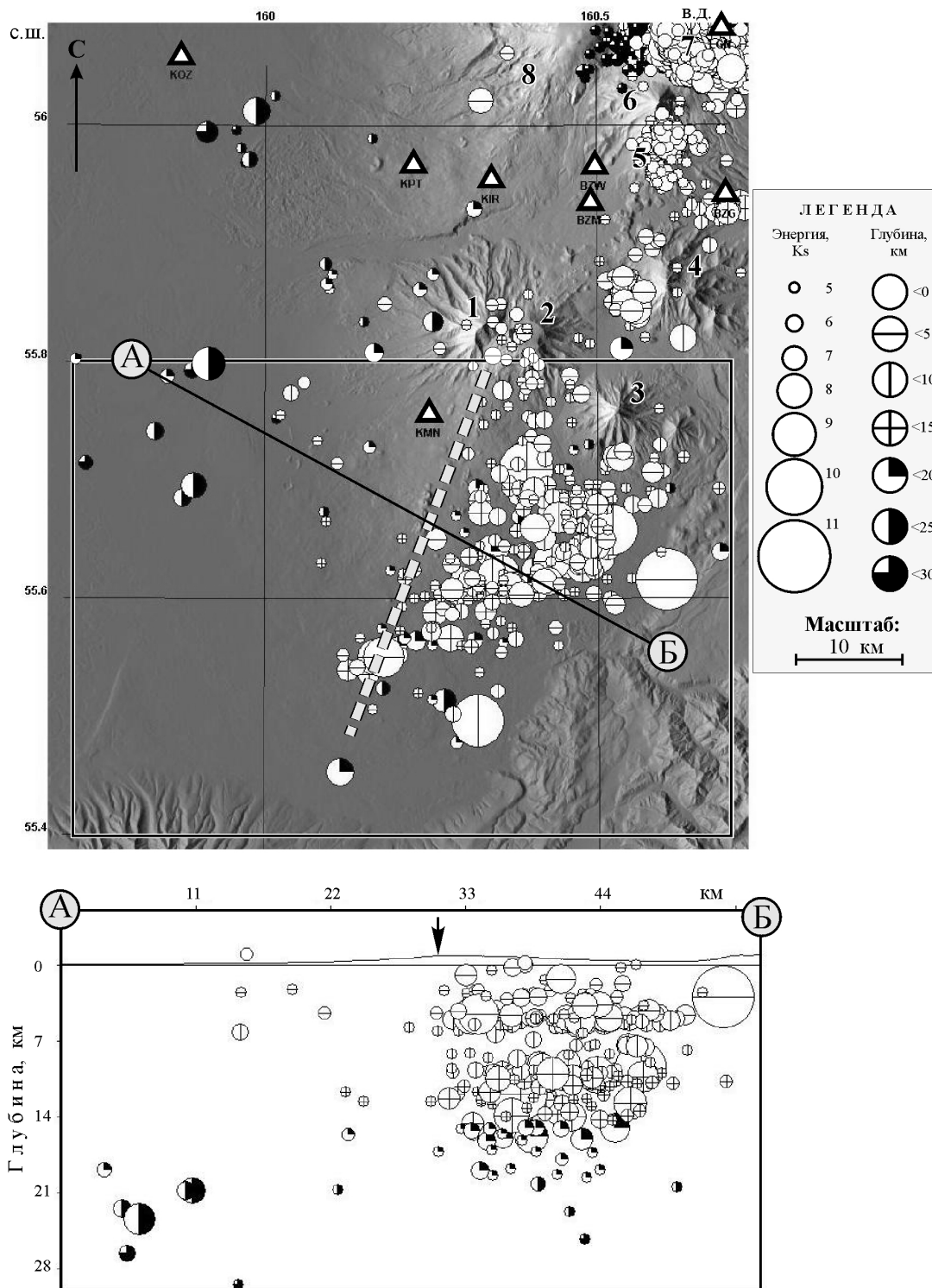


Рис. 1. Мелкофокусная сейсмичность южной части Ключевской группы вулканов. а – карта эпицентров землетрясений, которые были зарегистрированы Камчатской региональной сетью сейсмических станций в 2001–2011 гг. на глубине до 30 км. Диапазон энергетических классов: $5 \leq K_S \leq 11$. Сейсмические станции обозначены треугольниками. Пунктирная линия – основной магмоподводящий разлом в центральной части Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов. Номерами на карте обозначены вулканы: 1 – Острый Толбачик, 2 – Плоский Толбачик, 3 – Большая Удина, 4 – Острая Зимина, 5 – Безымянный, 6 – Камень, 7 – Ключевской, 8 – Ушковский; б – проекция на вертикальную плоскость АБ гипоцентров землетрясений из области, очерченной на карте прямоугольником. Стрелкой отмечено пересечение плоскости АБ и разлома.

БТТИ 1975–1976 гг. и нового трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг.

Хронология сейсмических событий до и в ходе БТТИ подробно описана в [1–3, 9]. Извержение предварялось короткой, но интенсивной сейсмической подготовкой ($K_S = 9 \div 11$) и было успешно предсказано [7]. Первый рой землетрясений, который был зарегистрирован перед началом образования Первого конуса БТТИ, имел тенденцию к уменьшению глубины гипоцентров во времени, иллюстрируя процесс продвижения магмы к поверхности. Интересной особенностью сейсмического процесса в ходе извержения является миграция землетрясений от вулкана Плоский Толбачик и СП на юг, вдоль Толбачинского Дола, в область ЮП и далее, что, согласно [1], свидетельствует о скрытом перераспределении базальтов в питающей системе извержения.

Перед извержением 2012–2013 гг., которое началось 27 ноября 2012 г., наблюдалась другая ситуация: очевидная сейсмическая активизация стала наблюдаться лишь в последние сутки перед прорывом, а относительно сильные землетрясения $K_S = 10 \div 11$ не наблюдались вообще. Однако технические характеристики современной системы мониторинга сейсмической активности Ключевской группы вулканов позволяют исследовать процессы подготовки извержения на более низком, чем в 1975 г., энергетическом уровне и выявить скрытые особенности сейсмического процесса.

Для обнаружения возможных аномалий, предшествовавших трещинному Толбачинскому извержению 2012–2013 гг. им. 50-летия ИВиС ДВО РАН (ТТИ-50), проведён ретроспективный анализ сейсмичности района извержения по каталогу Ключевской группы вулканов 1999–2012 гг. Рассматривались сейсмические события, зарегистрированные в радиусе 10 км от вершины вулкана Плоский Толбачик в диапазоне глубин до 30 км. Ретроспективный анализ сейсмических данных позволил выявить аномалию сейсмического режима перед началом трещинного ТТИ-50. Аномалия проявляется в параметрах сейсмичности низкого энергетического уровня (преимущественно $K_S = 4 \div 6$) и представляет собой статистически значимую сейсмическую активизацию: увеличение скорости сейсмического потока и скорости выделения сейсмической энергии (рис. 2). Длительность аномалии (с появления возможности её идентификации в оперативном режиме) составляет не менее 3 месяцев. На карте эпицентров сейсмическая активизация проявляется в виде двух пространственно разнесённых групп землетрясений и охватывает обширную область: как зону нового извержения, так и всю постройку вулкана Плоский Толбачик [6].

Для того, чтобы оценить и охарактеризовать выявленную сейсмическую активизацию, была применена шкала уровня сейсмичности СОУС'09 [5]. Шкала СОУС'09 привязана к статистической функции

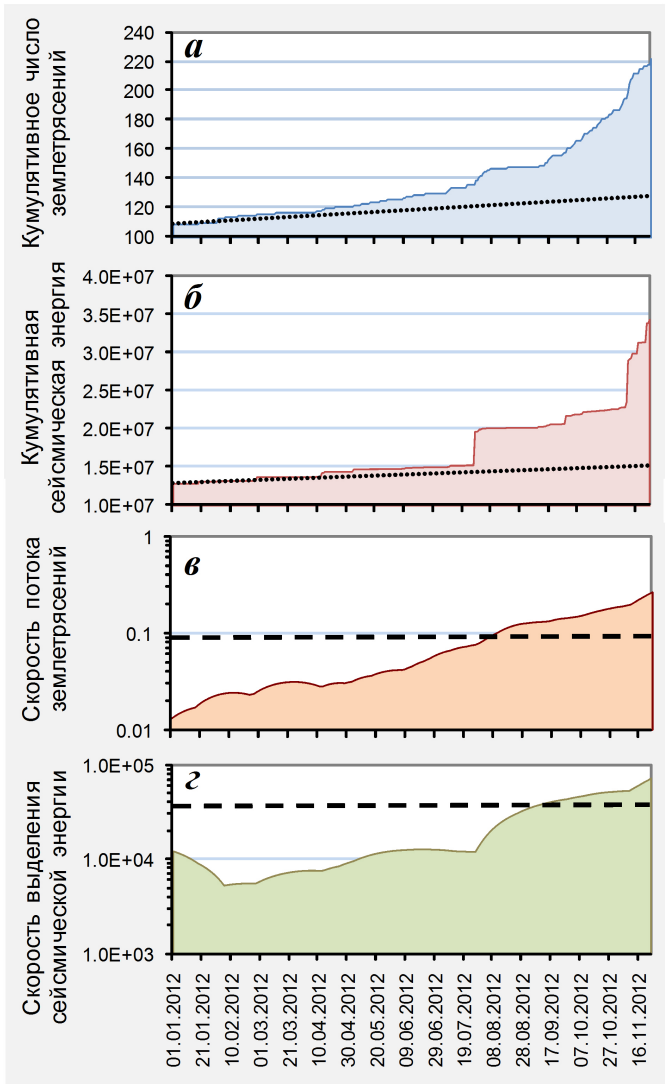


Рис. 2. Аномалия сейсмического режима перед трещинным Толбачинским извержением 2012–2013 гг. в параметрах сейсмичности. а — кумулятивный график числа землетрясений, б — кумулятивный график выделившейся сейсмической энергии (точечные пунктиры на а и б моделируют накопление числа землетрясений и выделившейся энергии со средней скоростью, определённой 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.

распределения сейсмической энергии как к параметру, характеризующему уровень сейсмичности заданного пространственного объекта в определённый временной интервал. С помощью этого подхода ретроспективно выявлен статистически значимый переход уровня сейсмичности с фонового на вы-

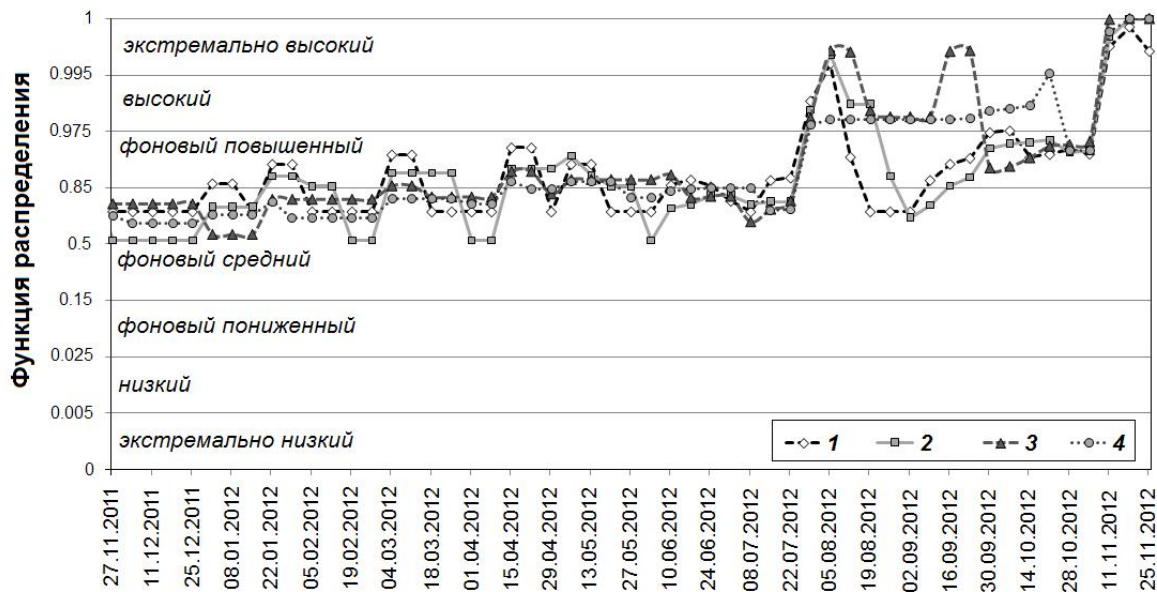


Рис. 3. Временной ход уровня сейсмичности в радиусе 10 км от вершины вулкана Плоский Толбачик в диапазоне глубин до 30 км в различных временных окнах за один год до начала извержения: предвестниковая сейсмическая активизация. Временные окна: 1–15 суток, 2–30 суток, 3–60 суток, 4–90 суток. Конечная дата анализа – 25 ноября 2012 г.

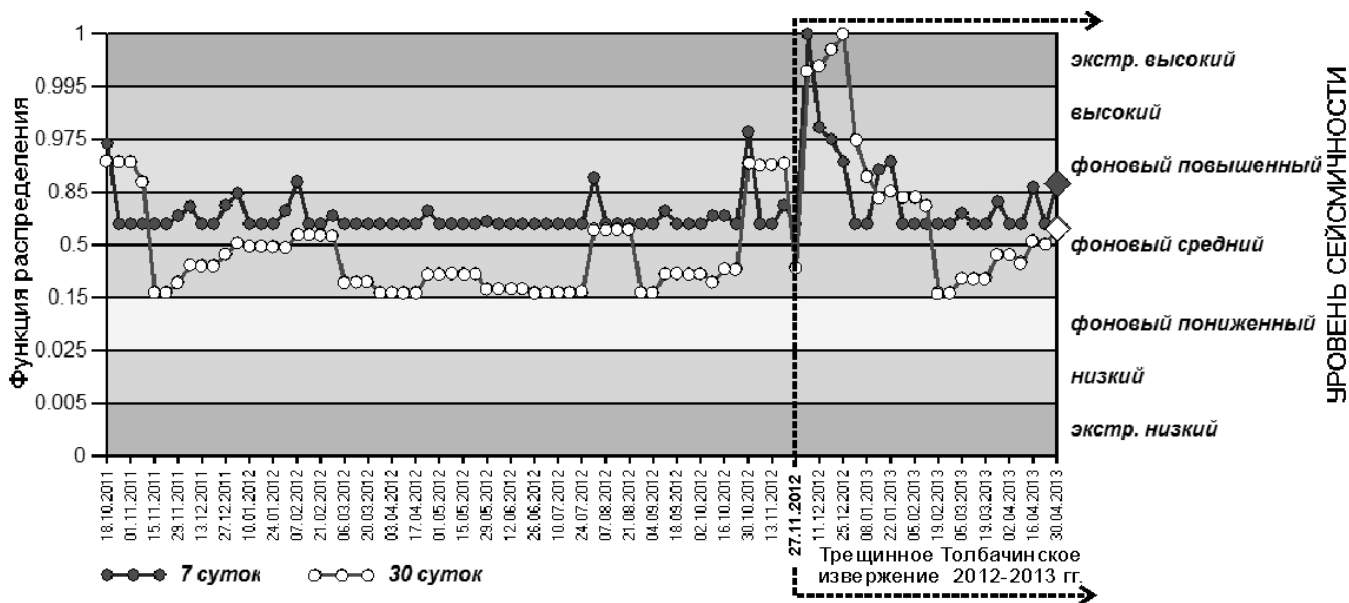


Рис. 4. Временной ход уровня сейсмичности Толудской эпицентральной зоны: сейсмическая активизация, начавшаяся через 3 суток после начала трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг.

сокий, а затем на экстремально высокий уровень, что соответствует многократному увеличению числа землетрясений и выделившейся сейсмической энергии в июле–ноябре 2012 г. (рис. 3). Уход с фонового уровня отмечается с августа 2012 г. Последние три недели перед ТТИ-50 сейсмичность анализируемого сейсмоактивного объема находилась на экстремально высоком уровне. Аномалия является уникальной для сейсмического процесса в районе вулкана Плоский Толбачик и не имеет аналогов по сейсмическим данным 1999–2012 гг.

Сейсмический отклик Толудской эпицентральной зоны на вулканическую деятельность

Область современной сейсмичности и вулканической активности Толбачинского Дола и вулкана Плоский Толбачик генетически связана с так называемой Толудской эпицентральной зоной (ТЭЗ), выделенной в ходе БТТИ [1, 3]. В 1975 г. ТЭЗ проявляла значительную поверхностную сейсмическую активность, синхронную развитию Второго и Третьего конусов СП БТТИ и обрушению на вершине вулкана Плоский Толбачик. Предполагается, что

сейсмическая активность этой зоны в 1975 г. была связана именно с перемещением базальтов на малых глубинах в Южную часть Толбачинского Дола. В ходе БТТИ число землетрясений в ТЭЗ и их сейсмическая энергия были в 5–10 раз больше, чем непосредственно в районе самого извержения. ТЭЗ охватывала площадь около 400 км²: вулкан Плоский Толбачик и область к югу и юго-востоку от него, то есть располагалась восточнее осевой линии Толбачинского Дола, как и область проявлений современной сейсмической активности.

В 2012 г. активизация ТЭЗ началась через несколько суток после начала ТТИ-50. Её наиболее активная фаза была недолгой и длилась примерно до середины декабря 2012 г., в этот период в ТЭЗ выделялась сейсмическая энергия около $2,14 \cdot 10^{11}$ Дж, а максимальный энергетический класс достиг 11,3 (в то время как в 1975 г. эта величина не превышала 9,3). Вариации уровня сейсмичности ТЭЗ по шкале СОУС'09 приведены на рис. 4. В первые недели после начала ТТИ-50 сейсмичность ТЭЗ пребывала на экстремально высоком уровне во временных окнах 7–30 суток.

Запаздывание активизации ТЭЗ в ходе рассматриваемых трещинных извержений составило:

в 1975 г. — около 1,5 мес от начала предвестниковой сейсмической активизации и около 1 мес от начала извержения; синхронно с провалом и образованием вершинной кальдеры на вулкане Плоский Толбачик;

в 2012 г. — не менее 3–4 мес от начала сейсмической активизации и около 3 суток от начала извержения (рис. 3, 4).

Процесс затухания сейсмичности ТЭЗ после БТТИ длился примерно до 1988 г., после чего уровень сейсмичности пребывал преимущественно на среднем фоновом уровне. Однако нами отмечены случаи возмущения уровня сейсмичности ТЭЗ во временных окнах 30–90 суток, которые предварялись усилением сейсмической активности вулкана Плоский Толбачик. Запаздывание активизаций ТЭЗ составляет первые единицы месяцев. В настоящее время эти вариации сейсмичности исследуются более детально.

Приведенные факты позволяют рассматривать ТЭЗ как область скрытой интрузивной деятельности, связанной с магматической системой юга Ключевской группы вулканов, но при этом пока не сопровождающейся поверхностными проявлениями магматизма. По результатам исследования распределения относительных скоростей поперечных сейсмических волн в районе Толбачинского Дола в работе [4] показано, что в области ТЭЗ наблюдается низкоскоростная аномалия на глубине выше границы кристаллического фундамента, что согласуется высказанным выше предположением.

Таким образом, развитие и совершенствование наблюдательной сети в районе Ключевской группы вулканов позволяет в настоящее время по-новому анализировать и интерпретировать сейсмичность этой вулканической области. В районе «вулкан Плоский Толбачик — Толбачинский Дол» для обеспечения регистрации землетрясений, связанных с извержением 2012–2013 гг. и не фиксируемых региональной сетью, в 2013 г. развернута группа временных широкополосных сейсмических станций. Такие наблюдения, базирующиеся на современных цифровых сейсмометрах, проводятся в этом районе впервые и дадут дополнительную информацию об особенностях сейсмичности низкого энергетического уровня.

Исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (грант 13–05–00 117).

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 гг. / Отв. ред. Федотов С. А. М.: Наука, 1984. 683 с.
2. Горельчик В. И., Зобин В. М., Чубарова О. С. Сейсмичность и динамические характеристики очагов землетрясений в районе Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975–1978 гг. // Вулканология и сейсмология. 1981. №3. С. 73–98.
3. Горельчик В. И., Чубарова О. С., Гарбузова В. Т. Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки, 1971–1983 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 90–100.
4. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Горбатилов А. В. и др. Новые данные о глубинном строении Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения // ДАН. 2011. Том 441. № 4. С. 539–543.
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. 16–19.
7. Токарев П. И. Предсказание места и времени начала большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // ДАН СССР. 1976. Том 229. № 2. С. 439–442.
8. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
9. Федотов С. А., Уткин И. С., Уткина Л. И. Периферический магматический очаг базальтового вулкана Плоский Толбачик, Камчатка: деятельность, положение и глубина, размеры и их изменение по данным о расходе магм // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 3–20.
10. Чебров В. Н., Дроздин Д. В., Кугаенко Ю. А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.