

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПЛАНИРОВАНИЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ДРОЖАНИЯ НА КАМЧАТСКИХ ВУЛКАНАХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ МАГМАТИЧЕСКОЙ, ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ПРОГНОЗА ИЗВЕРЖЕНИЙ

**Иванов В.В.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский;  
e-mail: victor@kscnet.ru*

## **Введение**

Вулканическое дрожание (ВД) представляет собой продолжительные (длительностью от нескольких минут до нескольких месяцев) колебания с частотами примерно от 0.1 до 10 Гц, источник которых находится в магматической питающей системе вулкана (Токарев, 1981; Cosentino et al., 1982; Koynagi et al., 1987; McNutt, 1985).

Согласно устному сообщению Р. Койанаги (Токарев, 1981), на Гавайских вулканах около 90% длительности регистрировавшегося ВД приходится на период извержений вулканов и только 10% - на период покоя. В 99% случаев оно имеет близповерхностный очаг и в 1% случаев источник находится на глубинах 30-40 км. На Ключевском вулкане (Камчатка) ВД обычно сопровождает вершинные и побочные извержения, но нередко отмечается и во время спокойного состояния вулкана (Иванов, 2008). Слежение за параметрами вулканического дрожания имеет важное значение для контроля вулканической активности и для прогнозирования времени и места вулканических извержений и их опасных взрывных фаз (Иванов, 1988, 2003, 2008; Широков, 1985).

Определение распределения источников ВД по глубине представляет интерес в связи с проблемой изучения магматических процессов и самого процесса вулканического извержения (Chouet, 1996; Chouet et al., 1998). Определение положения источников ВД в плане важно для крупных вулканических центров, в которых современные извержения происходят как в вершинном кратере вулкана, так и в пределах его протяженных (10-20 км) зон шлаковых конусов (рифтовых зон) (Фарберов, Гаретовская, 1978; Koynagi et al., 1987). Недавний пример - вулкан Горелый (Южная Камчатка), на котором в 2008 г. постоянно наблюдается вулканическое дрожание. Это происходит при отсутствии явных признаков вулканической активности и положение источника ВД пока неизвестно. Поэтому изучение параметров источников ВД, в особенности их глубины и положения в плане, может быть полезным как для понимания механизма магматической и вулканической деятельности, так и для прогноза извержений и слежения за их ходом.

В отличие от импульсных сейсмических сигналов (землетрясений) вулканическое дрожание, как правило, не имеет различимых вступлений волн. Поэтому для него неприменимы обычные методы определения источника генерации, основанные на измерении времен вступлений объемных волн на отдельных, разнесенных на сравнительно большие расстояния, сейсмостанциях. Стационарность характеристик вулканического дрожания, однако, делает этот тип источника идеальным для анализа, используя методы сейсмических антенн (групп) (Chouet et al., 1998).

На протяжении более чем 30 лет сейсмических наблюдений за вулканическим дрожанием на Камчатке получен обширный фактический материал. Он позволил определить положение источников ВД в плане, изучить спектральные особенности и получить первые оценки глубины источников, что имело важное научное значение (Иванов, 2008). Дальнейшее развитие исследований в этом направлении невозможно без повышения их детальности, а соответственно и точности определения местоположения источников ВД. Не следует полагать, что увеличение длины реализации ВД является панацеей, позволяющей увеличить точность. Нередко этому препятствует недостаточная продолжительность сигнала или интервала стационарности ВД. Во время взрывов вулканского типа на вулканах

Карымский, Шивелуч, Ключевской дрожание продолжается всего несколько минут и обычно представляет собой нестационарный процесс. Лучшее планирование измерительных сетей и использование адекватных моделей среды позволит повысить точность получаемых оценок и изучить имеющиеся нестационарности в сигнале, отражающие динамику развития вулканических взрывов. Эксперимент по изучению вулканического дрожания – это сложная и дорогостоящая практическая задача, к тому же повторить такой эксперимент обычно не удастся. Поэтому для вулканического дрожания анализ разрешающей способности сети и ее оптимизация имеют такое же важное значение, как и для случая землетрясений.

Вопрос оценки эффективности сейсмических антенн для изучения шумовых сигналов разработан недостаточно. В работе (Шубик, Киселевич, 1993) исследуется разрешающая способность сети для метода, основанного на оценках энергии когерентного сигнала. В работе (Chouet et al., 1998) исследуются ошибки определения положения источника ВД частотно-медленным методом. Обе эти работы основаны на моделировании измерительной информации по методу Монте-Карло, что представляется неоправданным усложнением. Более перспективным, на наш взгляд, является использование линейризованных оценок, что приводит к простым, геометрически ясным формулам. В работе (Горицкий и др., 1990) приведены самые первые выражения для линейризованного критерия качества определения положения источника ВД в плане для случая однородной среды и сейсмологических сетей, состоящих из профильно-угловых расстановок. В работе (Иванов, 2008) рассматривается более общий случай неоднородной среды, произвольной сейсмической антенны и определения положения источника ВД в плане и по глубине. В настоящей работе мы продолжаем апробировать эту методику на примере исследования эффективности еще двух сетей: на вулкане Ключевской (поляризационный метод) и на вулкане Карымский (для изучения источников микроземлетрясений стандартным нелинейным методом наименьших квадратов).

Целью работы является исследование разрешающей способности и планирование двух сейсмических сетей для изучения ВД и микроземлетрясений на Камчатке. Под оценкой эффективности сети нами понимается: – построение распределения в пространстве некоторого критерия качества (локального), который характеризует эффективность сети в каждой точке пространства; – нахождение минимального значения этого критерия в некоторой области, где априори может находиться источник ВД (глобальный критерий). Знание глобального критерия позволяет сравнивать между собой различные сейсмические сети.

### **Исследование эффективности и планирование сейсмологических сетей на вулканах Ключевской и Карымский**

Методическая основа и основные вычислительные формулы для анализа разрешающей способности сети для изучения ВД приведены в работе (Иванов, 2008). Для случая сетей трехкомпонентных сейсмостанций каждая сейсмостанция заменялась эквивалентной угловой расстановкой однокомпонентных датчиков с круговой диаграммой направленности (Горицкий и др. 1990). Сеть на вулкане Карымский, которая использовалась для определения положения очагов вулканических землетрясений, анализировалась с помощью подходов, изложенных в работе (Горицкий и др., 1987). Для исследования эффективности сети использовался алгоритм перебора точек исследуемой области по сетке координат и вычисления локальных значений критерия качества. Значение критерия вычислялось в каждой точке сетки как корень квадратный из минимального собственного числа матрицы линейризованных шкал приемников  $L$  (Горицкий и др. 1987, 1990; Иванов 2008). Предполагалось, что поверхностные или объемные волны распространяются в однородной и изотропной недиспергирующей среде с постоянной скоростью волн  $V$ . Результаты, в основном, будем приводить в терминах условного безразмерного критерия качества  $F_1$ ,

связанного с критерием  $F$  размерности [с/км] соотношением (Горицкий и др., 1987; Иванов, 2008):

$$F_1 = V \cdot F.$$

Глобальный критерий эффективности измерительной сети:

$$F^*(\Omega) = \min_{x^0 \in \Omega} F_1^*$$

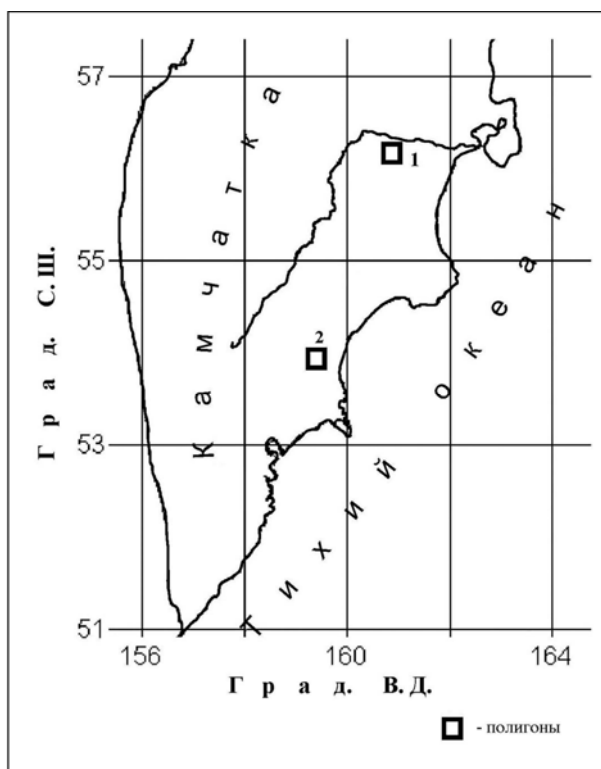
где  $\Omega$  – область допустимых значений координат источника ВД, обычно известная из других данных.

Входными данными для расчетной схемы являлись: размерность пространства, число локальных угловых расстановок сейсмометров или трехкомпонентных сейсмостанций, составляющих сейсмическую сеть, скорости волн  $V$ , координаты центров расстановок, расстояние между приемниками  $h$  и шаг сетки по координатам. Для каждой точки  $x^0$  сетки рассчитывались матрица линеаризованных шкал  $L$  и значение безразмерного критерия качества  $F_1$ . Затем в области  $\Omega$  находилось значение глобального критерия, что позволяло сравнивать между собой различные сети.

### Сеть на вулкане Ключевской

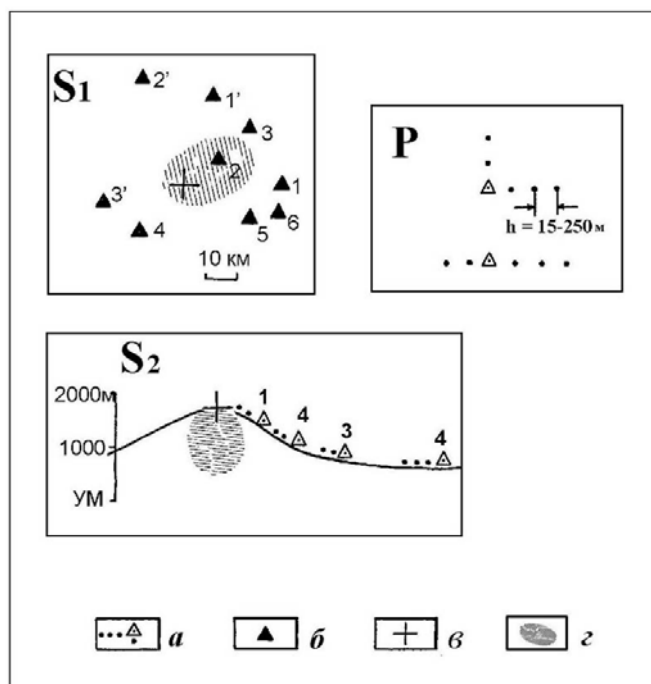
На рис. 1 показаны два полигона, на которых временно проводилось изучение вулканического дрожания (микроземлетрясений) на Камчатке. Соответствующие сети показаны на рис. 2.

Сеть  $S_1$  (рис. 2) представляла собой площадную расстановку из шести трехкомпонентных сейсмостанций, позволявшую поляризационным методом с помощью пересечения

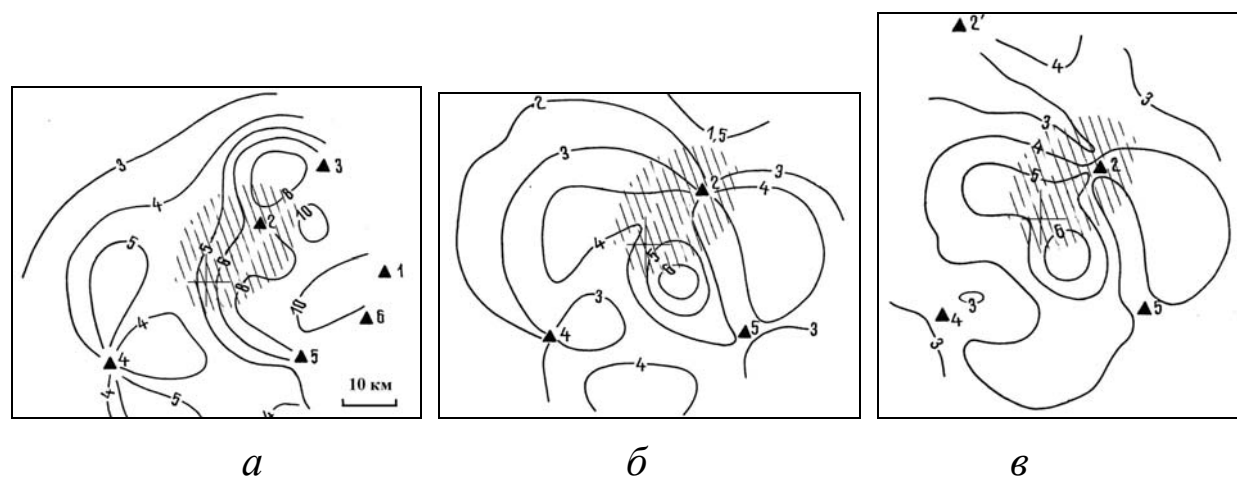


**Рис. 1.** Полигоны для временных наблюдений вулканического дрожания и микроземлетрясений на Камчатке: 1 – на вулкане Ключевской в июле - августе 1984 г., 2 – на вулкане Карымский в августе 1978 г. Соответствующие сейсмические сети показаны на рис. 2.

пеленгов с разных пунктов оконтуривать область генерации ВД в плане в период извержения вулкана Ключевской в июле-августе 1984 г. Там также применялись и профильные расстановки однокомпонентных сейсмометров для изучения волнового и спектрального состава ВД (Гордеев и др., 1986). Область априорного положения источника ВД в плане  $\Omega$  для этой сети охватывает вершинный кратер Ключевского вулкана и все его современные побочные прорывы. Она аппроксимируется нами эллипсом с большой полуосью длиной 20 км и ориентированной в СВ направлении. Треугольниками со штрихом на рис. 2 показаны смещенные положения сейсмостанций, что отражает другую конфигурацию сети во время полевых работ. На рис. 3 изображены изолинии безразмерного критерия качества  $F_1$  локации шумового источника ВД на вулкане Ключевском исходной сетью ( $S_1$ ) и сетями, полученными из нее путем исключения и перемещения станций. Видно, что изменение конфигурации сети значительно меняет топологию изолиний критерия качества. Наиболее однородно поле критерия качества для исходной сети, которую следует признать хорошей и не требующей оптимизации.



**Рис. 2.** Сети временных наблюдений для локации сейсмических источников на Камчатке:  $S_1$  – на вулкане Ключевской в 1984 г.;  $S_2$ , – на вулкане Карымский в 1983 г.  $S_1$  была размещена в горизонтальной плоскости для планового определения положения источников дрожания, а  $S_2$  – в вертикальной плоскости, проходящей через вершину Карымского вулкана для определения положения очагов вулканических микроземлетрясений. Обозначения: *a* – локальная угловая расстановка однокомпонентных сейсмометров (P), *б* – трехкомпонентная сейсмостанция, *в* – положения вершинных кратеров вулканов, *z* – область априорного положения источника дрожания  $\Omega$ , УМ – уровень моря. Пояснения в тексте.

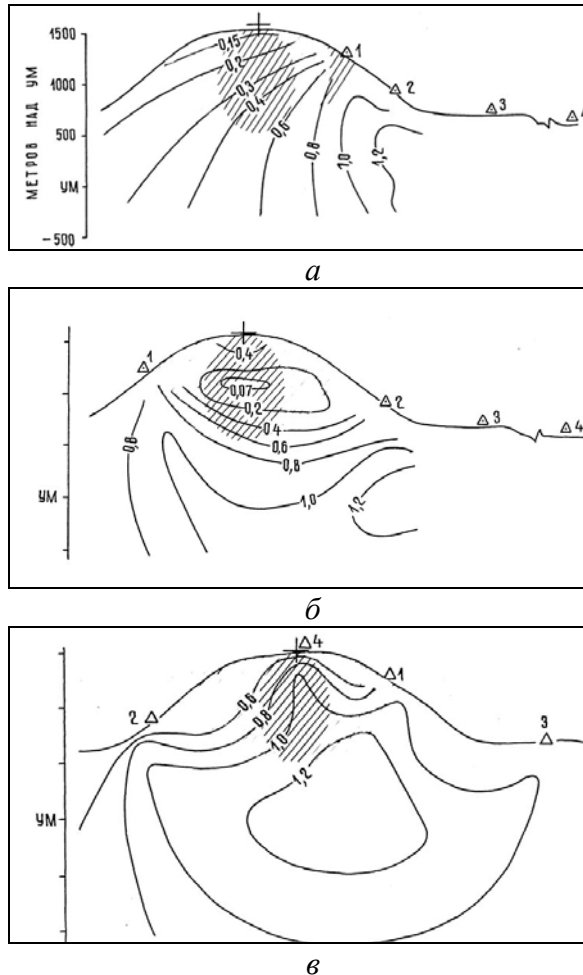


**Рис. 3.** Изолинии безразмерного критерия качества  $F_1$  локации источника дрожания на вулкане Ключевской (в тысячных долях, показано в горизонтальной плоскости, аппроксимирующей поверхность Земли): *a* – исходная сеть ( $S_1$ ) из шести трёхкомпонентных сейсмостанций; *б* – сеть ( $S_1$ ) с исключенными пунктами № 1 и № 6; *в* – сеть ( $S_1$ ) с исключенными пунктами № 1 и № 3 и дополнительным пунктом № 2. Обозначения на рис. 2.

### Сеть на вулкане Карымский

Сеть  $S_2$  использовалась на вулкане Карымский в августе 1978 г. для изучения вулканических землетрясений (Фарберов и др., 1983). Она состояла из четырех угловых расстановок однокомпонентных сейсмометров (рис.2). На вертикальной плоскости, проходящей через вершину вулкана, показаны только те элементы расстановок (P), которые шли вниз по склону вулкана. Ортогональные плечи расстановок располагались перпендику-

лярно плоскости чертежа и не оказывали в линейном приближении влияния на расчет эффективности сети в указанной плоскости. Конфигурация области  $\Omega$  выбиралась из совпадения ее с областью микроземлетрясений под Карымским вулканом, которую мы интерпретируем как магмоподводящую зону. Расстояние между сейсмометрами в расстановке (Р) выбиралось в пределах пространственного интервала корреляции сигналов от 15 до 250 м в зависимости от используемого частотного диапазона.



**Рис. 4.** Изолинии безразмерного критерия качества  $F_1$  локации источника микроземлетрясений на вулкане Карымский (показано в вертикальной плоскости, проходящей через вершину вулкана и через профили расстановок): *a* – исходная сеть ( $S_2$ ) из 4-х профильно-угловых расстановок; *б* – сеть ( $S_1$ ) со смещенным положением расстановки № 1 (плохая сеть); *в* – сеть ( $S_1$ ) со смещенным положением расстановок № 2 и № 4 (хорошая сеть).

является относительно плохой. Напротив, для сети, изображенной на рис. 4в, в области  $\Omega$  характерны сравнительно высокие значения критерия качества  $F_1$ , поэтому она намного лучше двух предыдущих сетей.

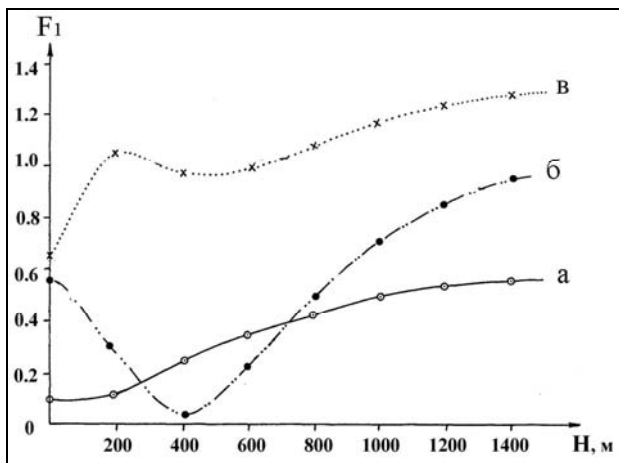
В таблице приведены значения глобального безразмерного критерия качества и эффективности сети  $\mathcal{E}$  для исходной сети  $S_2$  и для ее двух модификаций. Эффективность сети рассчитывалась как отношение ее глобального критерия к критерию для исходной сети по формуле

$$\mathcal{E} = F^*_1 / F^*_{1\text{исх.}}, \%$$

Изолинии критерия  $F_1$  для исходной сети изображены на рис. 4 а). На рисунке видно, что минимальное в области  $\Omega$  значение  $F_1$  равно примерно 0.15, причем минимум располагается на малых глубинах. Глубина отсчитывается от вершины вулкана вниз. Попробуем изменить конфигурацию сети и посмотреть, нельзя ли увеличить эффективность сети в этой области. С целью получения более оптимальной сети будем осуществлять простейшие симметрические смещения угловых расстановок относительно вертикали, проходящей через вершину вулкана, не изменяя число расстановок. Исследовалась эффективность двух модификаций сети  $S_2$ :

- с профилем № 1, смещенным симметрично относительно вершины вулкана (рис. 4б);
- с профилем № 2, смещенным симметрично относительно вершины вулкана, и профилем № 4, перенесенным на вершину вулкана (рис. 4 в).

На рис. 4б и 4в показаны изолинии безразмерного критерия качества  $F_1$  локации землетрясений на вулкане Карымский для указанных модификаций сети  $S_2$ . Видно, что изменение конфигурации сети существенно меняет топологию изолиний критерия качества. Изменение  $F_1$  как функция глубины, отсчитываемой от вершины вулкана, для сетей (рис. 4а-в) изображено на рис. 5. Для сети (рис. 4б) в области  $\Omega$  имеется достаточно глубокий минимум на глубинах около 400м, поэтому такая сеть



**Рис. 5.** Распределение безразмерного критерия качества  $F_1$  локации источника микроземлетрясений на вулкане Карымский по глубине  $H$  для сетей, изображенных на рис.4 а-в. Функция  $F_1$  показана на вертикальной прямой, проходящей через вершину вулкана; глубина  $H$  отсчитывается от вершины вулкана вниз.

Если исходная сеть имеет эффективность 100%, то сеть, полученная из неё симметричным смещением расстановки № 2, имеет эффективность всего 48%. То есть, неудачным смещением одной элементарной расстановки мы ухудшаем эффективность всей сети. Напротив, модификация сети (рис. 4в) имеет эффективность около 400% (таблица).

**Таблица.** Значения глобального безразмерного критерия качества  $F^*_1$  и эффективности  $\mathcal{E}$  локации источника дрожания в области  $\Omega$  на вулкане Карымский для исходной сети ( $S_2$ ) из четырёх угловых расстановок (рис. 4а) и для двух ее модификаций (рис. 4б, 4в)

№ п/п	Измерительная сеть (рис. 4)	$F^*_1$ , сотые доли	$\mathcal{E} = F^*_1 / F^*_{1\text{исх.}}$ , %
1	а	15	100
2	б	7	48
3	в	60	400

Таким образом, изменение конфигурации измерительной сети позволило в 4 раза увеличить ее разрешающую способность! Такая высокая эффективность сети (рис. 4в), очевидно, объясняется тем, что эта сеть имеет значительно большую апертуру по вертикали по сравнению с первыми двумя сетями. При этом, ее апертура в горизонтальном направлении не уступает апертурам этих двух сетей.

### Заключение

На основании анализа литературы показано, что определение местоположения источников вулканического дрожания имеет важное значение для изучения механизма вулканической и магматической деятельности и для прогнозирования опасных вулканических явлений.

Исследована разрешающая способность двух временных сетей сейсмических станций по изучению вулканического дрожания и микроземлетрясений на вулканах Ключевской и Карымский (Камчатка). Проведена оптимизация сетей, в результате которой эффективность одной из сетей удалось увеличить в четыре раза. Это показывает применимость и практическую значимость ранее разработанной методики исследования эффективности сейсмологической сети для изучения землетрясений и вулканического дрожания (Горицкий и др. 1987; Иванов, 2008).

Сделан вывод, что разрешающая способность локации источников ВД в значительной степени определяется конфигурацией используемой сейсмологической сети. Применение более эффективных сетей позволит обеспечить более высокую разрешающую способность метода, что даст возможность изучить имеющиеся нестационарности в сигнале ВД и более полно механизм взрывных вулканических землетрясений.

## Список литературы

- Гордеев Е.И., Мельников Ю.Ю., Синицин В.И., Чебров В.Н.* Вулканическое дрожание Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1986. № 5. С. 39-53.
- Горицкий Ю.А.* Способность измерительной системы различать протяженные источники излучения // Цифровое моделирование и оптимизация режимов промышленных объектов и систем. Межвузовский тематический сборник. М.: Изд-во МЭИ, 1984. № 47. С. 92-100.
- Горицкий Ю.А., Феофилактов В.Д., Батасова В.С.* К оценке способности сетей сейсмоприемников различать протяженные и точечные источники // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 59-69.
- Горицкий Ю.А., Фарберов А.И., Иванов В.В., Курмашова Р.Р.* Сравнение сетей сейсмоприемников при измерении вулканического дрожания // Петропавловск-Камчатский. 1990. 34 с. Деп. в ВИНТИ 16.09.1990. № 4666-В90.
- Иванов В.В.* О сопоставлении тепловой мощности эруптивных струй и вулканического дрожания для извержений разных типов // Вулканология и сейсмология. 1988. № 5. С. 53-63.
- Иванов В.В.* Прогнозы крупных извержений вулканов на Камчатке и их оправданность // Вестник ДВО РАН. 2003. № 5. С. 97-108.
- Иванов В.В.* Текущий цикл активности Ключевского вулкана 1995 – 2008 гг.: развитие по сейсмологическим, фото, видео и визуальным данным // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога 27-29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 100-109.
- Иванов В.В.* Оценка эффективности и планирование сейсмологической сети для изучения вулканического дрожания // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. С. 141-153.
- Токарев П.И.* Вулканическое дрожание // Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 55-72.
- Фарберов А.И., Гаретовская И.В.* Исследование вулканического дрожания с помощью сейсморазведочной аппаратуры в районе Толбачинского извержения // Геологические и геофизические данные о БТТИ, 1975-1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 234-244.
- Фарберов А.И., Сторчеус А.В., Прибылов Е.С.* Исследование слабой сейсмичности вулкана Карымский в августе 1978 г. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 78-89.
- Широков В.А.* Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48-57.
- Шубик Б.М., Киселевич В.Л.* Микросейсмическая активность в гидротермальной области и задачи сейсмического мониторинга // Разработка концепции мониторинга природно-технических систем. Т.2. Методика и результаты геодинамического мониторинга природно-технических объектов. ГНТП «Безопасность населения и природно-хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф». М.: ИФЗ РАН, 1993. С. 58-72.
- Chouet B.A.* New methods and future trends in seismological volcano monitoring // Monitoring and mitigation of volcano hazards. Ed. By R. Scarpa, R.I. Tilling. Springer, 1996. P. 23-97.
- Chouet B.A., Dawson Ph., Luca G. De. et al.* Array analysis of seismic wavefields radiated by eruptive activity of Stromboli volcano. Italy: Felici Editore. 1998. CNR-Gruppo Nazionale Per La Vulcanologia. 158 p.
- Cosentino M., Lombardo G., Schick R., Sharp A.D.* Seismological researches on mount Etna: State of art and recent trends // Mem. Soc. Geol. It. 1982. № 25. P. 159-202.
- Koyanagi R.Y., Chouet B., Aki K.* Origin of volcanic tremor in Hawaii. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1350. W. 1987. P. 1221-1257.
- McNutt S.B.* Volcanic tremor: Basic facts and perspective (Abstract) // EOS Trans. Amer. Geophys. Union. 1985. V. 66. P. 1152.