

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ, КАМЧАТКА, В 2007-2013 гг.**Берсенева Н.Ю., Соболевская О. В.***Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, nata@emsd.ru***Введение**

Вулкан Горелый (52.55° с.ш., 158.03° в.д., абсолютная высота вершины 1829 м) является одним из наиболее активных вулканов Южной Камчатки. В географической, краеведческой и вулканологической литературе отмечено 12 его извержений. Все они имели эксплозивный характер и были приурочены к вершинным кратерам. Описание последних извержений 1980-1981 гг. и 1984-1986 гг. приводится в [1, 2, 5].

Сейсмические наблюдения на вулкане Горелый проводятся с 1980 г. Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН). В 1980 г. была установлена сейсмостанция «Горелый» (GRL). Радиотелеметрические сейсмические станции «Мутновка» (MTV) и «Асача» (ASA) (рис. 1), были установлены летом 2008 г. Все станции оборудованы трехкомпонентными комплектами короткопериодных каналов на базе сейсмометров СМ-3 для регистрации скорости смещения грунта в полосе частот 0.8 – 20 Гц [11].

На с/ст. GRL регистрируются землетрясения в районе влк. Горелый с минимальными величинами энергетических классов по S-волне $K_s=2.2$. По данным [8] в районе влк. Горелый до 2007 г. по трем ближайшим станциям Камчатской региональной сети сейсмических станций можно было регистрировать землетрясения с минимальным $K_s=6.0$. С 2008 г. появилась возможность регистрировать сейсмические события в районе влк. Горелый с минимальным $K_s=3.5$ с использованием записей на с/ст. MTV и ASA.

В 1980-1981 гг., после установки с/ст. GRL, были впервые получены сейсмометрические данные в период эксплозивного извержения влк. Горелый. В [1] приводятся результаты анализа сейсмической активности во время этого извержения и рассматриваются три фазы сейсмической активности с различными величинами выделившейся энергии. В [8] отмечалось, что сейсмическая активность после окончания извержения 1980-1981 гг. значительно понизилась: на с/ст. GRL регистрировались в среднем не более 10-20 землетрясений IV типа (по классификации вулканических землетрясений П.И. Токарева [9]) в год.

Характеристика сейсмического режима во время извержения 1984-1986 гг. приводится в [2]. На основе анализа вулканического дрожания (ВД) и других проявлений активности автором [2] были выделены три фазы извержения. Описание активизации сейсмичности в районе влк. Горелый в 2007 - 2009 гг., приводится в работе [8]. В настоящей работе рассматривается динамика сейсмичности и другие проявления активности влк. Горелый по данным наблюдений 2007 - август 2013 гг.

Информационные ресурсы и методика исследований

Каталог камчатских землетрясений составляется лабораторией исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) КФ ГС РАН по результатам оперативной обработки. В базу данных (БД) включены землетрясения, для которых возможно определение основных параметров (дата и время в очаге; долгота, широта, глубина гипоцентра, энергетический класс $K_s = \lg E$, где E - энергия землетрясения в Дж) по трем и более станциям. К таковым относятся вулканические землетрясения I типа и большинство сейсмических событий II-III типов с $A/T > 0.2$ мкм/с, где A - амплитуда, T - период. Ниже такие землетрясения называются "сильными". БД размещена по адресу <http://ts.emsd.ru/>. Данные по "сильным" землетрясениям за 2007-2009 гг., которые отсутствуют в БД, были любезно предоставлены сотрудниками ЛИСВА и лаборатории сводной обработки КФ ГС РАН.

Для "сильных" землетрясений рассчитывалась их энергия по формуле $E=10^{K_s}$.

Фактографическая база данных «Активность вулканов Камчатки» (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) создана и пополняется ЛИСВА. В ней содержится информация о состоянии активных вулканов Камчатки по данным сейсмических и визуальных наблюдений. В базе имеется таблица сводных данных о сейсмичности действующих вулканов Камчатки. В ней учтены сейсмические события на вулканах, регистрируемые хотя бы одной станцией.

При описании состояния влк. Горелый в качестве опорной станции принимается с/ст. GRL. В таблице приводятся параметры сейсмичности в районе вулкана, осредненные за сутки. При этом все

зарегистрированные сейсмические события разделяются на типы по классификации П.И.Токарева, адаптированной к цифровой обработке [3]. В пополняемой таблице с суточными данными содержатся результаты наблюдений с 7 июля 2007 г. по настоящее время с небольшими перерывами, когда с/ст. GRL не работала (23.08 - 11.09.2007 г., 24.01 - 13.03.2009 г., 28.01 - 18.04.2010 г., 05.02 - 10.05.2012 г., 11.07 - 01.08.2013 г.).

Результаты

При анализе сейсмичности в районе влк. Горелый рассматривались "сильные" землетрясения в квадрате 52.50 - 52.62 с. ш. и 157.90 - 158.15 в. д. с глубинами гипоцентров до 20 км (рис. 1). Все они приурочены к постройке влк. Горелый. Для расчета параметров землетрясений в районе влк. Горелый используется региональный камчатский годограф, в котором учитываются свойства среды только ниже уровня моря [10]. Это обусловлено отсутствием специального годографа для района влк. Горелый, подобного годографам, созданным для Ключевской и Авачинской групп вулканов [7-8].

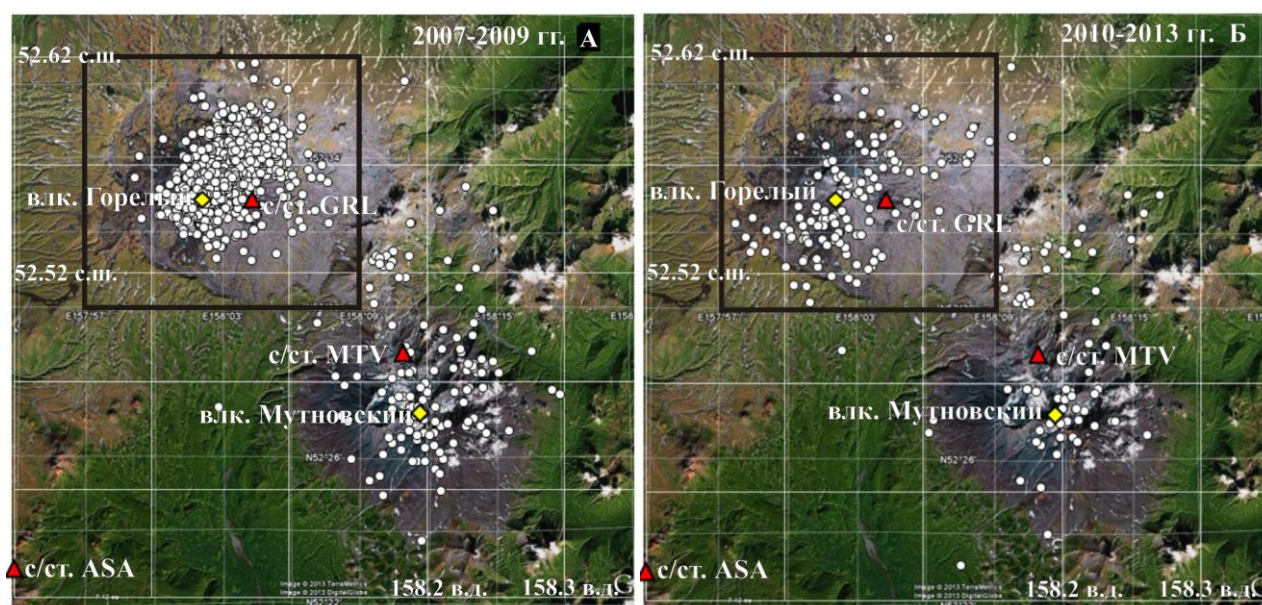


Рис. 1. Карты распределения эпицентров "сильных" землетрясений в районе влк. Горелый в 2007-2009 гг. (А) и 2010-2013 гг. (Б). Черным квадратом обозначен район детального анализа сейсмичности

Весной 2007 г. в записях на с/ст. GRL начали фиксироваться повышенные величины отношения А/Т вулканического дрожания (ВД) (рис. 2А). С июня 2007 по февраль 2009 гг. регистрировалось ВД со среднесуточными значениями $A/T \approx 0.7$ мкм/с. Максимальное среднесуточное значение $A/T = 2.36$ мкм/с зафиксировано 13 июня 2008 г. во время резкого кратковременного усиления ВД. Можно предположить, что усиление ВД сопровождало небольшие парогазовые эмиссии в активном кратере вулкана.

С апреля 2008 г. также наблюдалось увеличение числа сейсмических событий I-IV типов. В т. ч. фиксировалось значительное увеличение количества землетрясений I и II-III типов (рис. 2В). П.И. Токаревым сейсмические события I и II-III типов объясняются движением магмы по выводному каналу [9].

После перерыва в наблюдениях с 24 января по 13 марта 2009 г. на с/ст. GRL регистрировалось ВД с величинами $A/T \approx 0.14$ мкм/с, что в пять раз меньше значений, зафиксированных в 2007-2008 гг. Такой режим ВД сохранялся до 6 июня 2010 г.

На рис. 2Б-Д видно, что в период с 24 января 2009 по 5 июня 2010 гг. количество зафиксированных сейсмических событий всех типов увеличилось. Одной из причин этого может быть уменьшение ВД, что позволяло выделять в сейсмических записях на с/ст. GRL более слабые землетрясения с $K_s \geq 2.1$ на глубинах до 15 км (рис. 2Е-Ж).

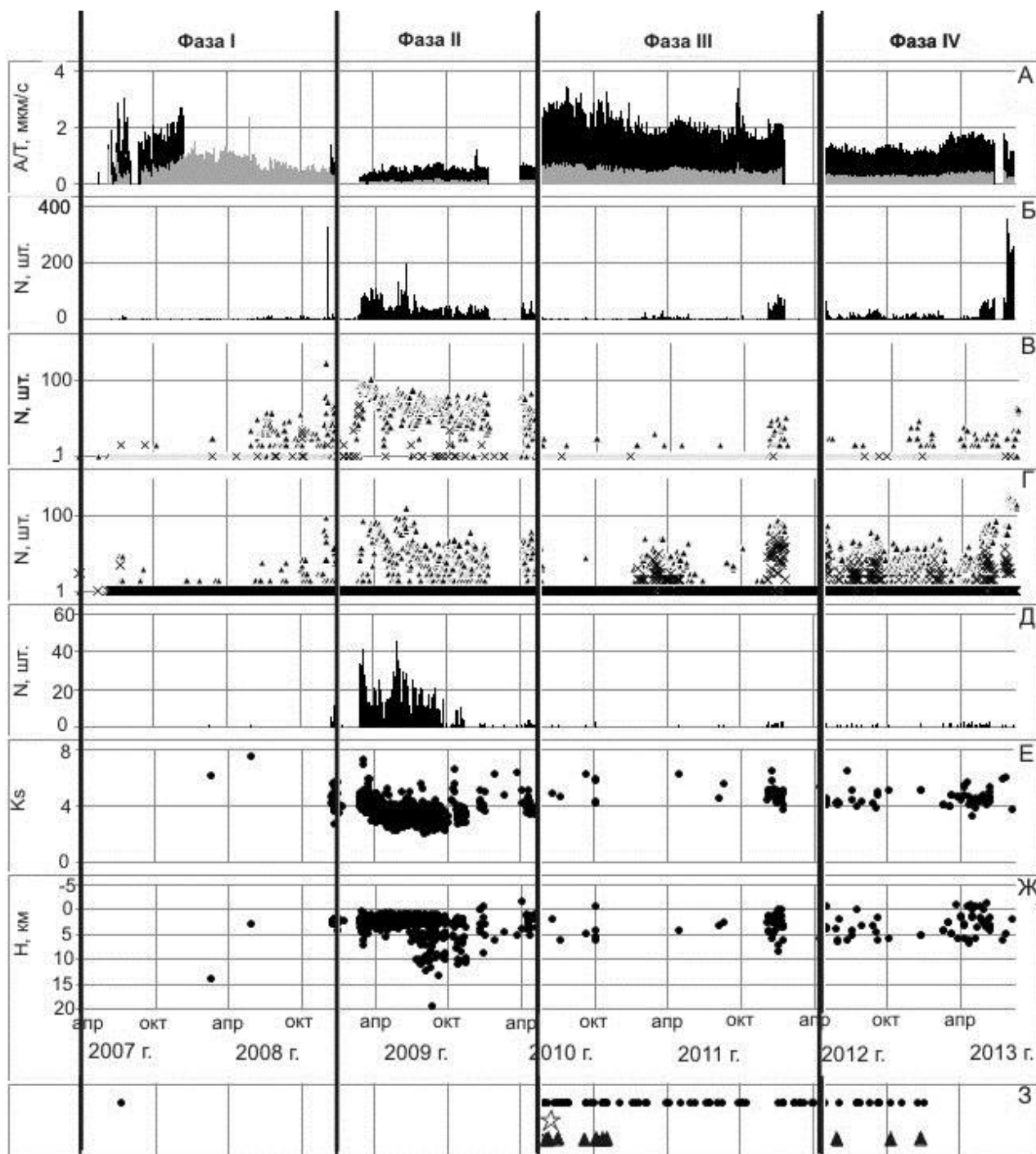


Рис. 2. Изменение параметров сейсмической активности в районе влк. Горелый в сопоставлении с вулканическими проявлениями, 2007 – 2013 гг.: А - вулканическое дрожание по данным станции GRL; серым цветом показаны среднесуточные величины отношения А/Т, черным - максимальные за сутки величины А/Т; Б - суммарное за сутки количество землетрясений I-IV типов и низкочастотных серий по данным с/ст. GRL.; В - суммарное за сутки количество землетрясений I типа (крестики) и II-III типа (треугольники); Г - суммарное за сутки количество землетрясений IV типа (треугольники) и низкочастотных серий (крестики); Д - суммарное за сутки количество "сильных" землетрясений; Е - величины энергетических классов K_s "сильных" землетрясений; Ж - глубины гипоцентров "сильных" землетрясений; 3 – вулканические проявления: точки - наличие парогазовой колонны высотой более 1000 м, треугольники - термальные аномалии, зарегистрированные на вкл. Горелый; звезда - образование новой высокотемпературной фумаролы по [4]. Жирными вертикальными линиями обозначены границы выделенных фаз в активизации влк. Горелый (пояснения см. в тексте)

По данным визуальных наблюдений 15-22 июня 2010 г. в стенке активного кратера была обнаружена новая фумарола (рис. 2 3). Из воронки диаметром 20 м происходила мощная эмиссия высокотемпературного (870 °С) газа [4]. Ее образованию предшествовала сейсмическая подготовка в

виде увеличения максимальных значений А/Т с 0.66 мкм/с (8.06.2010 г.) до 1.65 мкм/с (12.06.2010 г.). Также происходило усиление парогозовой деятельности: высота подъема колонны парогозовой эмиссии превышала 2000 м над кратером (рис. 2 З).

На протяжении всего 2010 г. над кратером почти постоянно наблюдались мощные парогозовые эмиссии, достигавшие высоты 3.5 км над уровнем моря (рис. 2 З). Согласно спутниковым данным в районе активного кратера фиксировалась термальная аномалия размером 1-6 пикселей, а также регистрировались парогозовые шлейфы, которые протягивались до 150 км в различных направлениях от вулкана. В 2011 г. периодически наблюдалась мощная парогозовая эмиссия, в темное время суток над кратером отмечалось свечение. На спутниковых снимках в районе вулкана отмечалась термальная аномалия размером до 3 пикселей (максимальная температура $T_{\max}$ до 18 °С). В течение года интенсивность аномалии была постоянной, что может свидетельствовать о стабильности тепловой разгрузки [4].

С момента образования новой фумаролы и до 5 февраля 2012 г. величины А/Т вулканического дрожания были повышенными (среднесуточные А/Т $\approx$ 0.8 мкм/с). Количество зафиксированных сейсмических событий в этот период уменьшилось. В это время, по-видимому, из-за повышенной интенсивности ВД, в каталоге отсутствовали "сильные" землетрясения с $K_s < 4$ (рис. 2Е).

В феврале 2012 г. среднесуточные значения А/Т снизились с 0.58 мкм/с до 0.32 мкм/с. В период февраль - март 2013 г. фиксировались слабые термальные аномалии в районе кратера размером в 1-2 пикселя и $T_{\max}$ до 15 °С. В мае 2012 г. произошло усиление парогозовой активности. Максимальная высота подъема парогозовой колонны (выше 2000 м над кратером) наблюдалась 16 и 17 июня 2012 г. По сейсмическим данным в эти дни сохранялось ВД с $A/T_{\max} = 0.94$ и 0.76 мкм/с, соответственно, и произошло 8 и 2 поверхностных событий I-IV типов.

В марте 2013 г. среднесуточные значения А/Т увеличились до 0.43 мкм/с, происходило увеличение числа событий IV типа (рис. 2Г). Но в августе среднесуточные значения А/Т понизились до $\approx$ 0.34 мкм/с, и количество сейсмических событий II-III и IV типов возросло (106 и 5113 событий/мес., соответственно). Такую совокупность явлений можно рассматривать в качестве предвестника изменения активности влк. Горелый.

На основе проведенного анализа параметров сейсмичности и вулканических проявлений (рис. 2) можно выделить четыре фазы в активности влк. Горелый в 2007-2013 гг. (табл.).

Таблица. Характеристика выделенных фаз I-IV во время активизации вулкана Горелый в мае 2007 - августе 2013 гг.

Фаза	I	II	III	IV
Временной интервал, мм.гггг - мм.гггг	07.2007 - 01.2009	03.2009 - 06.2010	06.2010 - 02.2012	05.2012 - 08.2013
Кол-во событий I-III типов, шт. (шт./мес.)	923 (46)	8958 (594)	154 (5)	299 (16)
Кол-во "сильных" событий* шт. (шт./мес.)	44 (1)	2653 (176)	40 (1)	56 (2)
Кол-во событий IV типа шт. (шт./мес.)	441 (22)	4980 (311)	1966 (102)	8973 (220)
Кол-во низкочастотных серий шт. (шт./мес.)	13 (<1)	0 (0)	416 (10)	467 (26)
Средняя величина энергетического класса K_s "сильных" землетрясений	6.0	4.0	5.0	4.8
Выделившаяся сейсмическая энергия "сильных" землетрясений Е, Дж	$3.6 \cdot 10^7$	$6.7 \cdot 10^7$	$2.0 \cdot 10^8$	$8.5 \cdot 10^6$
Средняя величина А/Т вулканического дрожания, мкм/с	0.68	0.14	0.58	0.36

Примечание: * события I-III типа, зарегистрированные на трех и более станциях.

Заключение

Весной 2007 г. в районе вулкана Горелый по данным станции GRL стали регистрироваться повышенные величины отношения А/Т вулканического дрожания. Это можно считать началом нового этапа активизации вулкана [8].

Для периода с июля 2007 по август 2013 гг. рассмотрены изменения параметров сейсмического режима в районе влк. Горелый в сопоставлении с другими проявлениями его вулканической активности; выделены четыре фазы активизации (табл.).

Фаза I характеризуется высокими значениями среднесуточных отношений А/Т вулканического дрожания (≈ 0.68 мкм/с) и постепенным увеличением количества сейсмических событий I-IV типов и низкочастотных серий.

Фаза II характеризуется пониженными значениями величины А/Т. В течение этой фазы было зарегистрировано наибольшее число сейсмических событий всех типов, в т.ч. наибольшее количество землетрясений I и II-III типов, которые, в соответствии с [9], связаны с движением магмы по выводящему каналу.

Фаза III характеризуется резким увеличением значений А/Т вулканического дрожания и относительно небольшим количеством зарегистрированных землетрясений из района влк. Горелый. Усиление ВД может быть обусловлено образованием новой высокотемпературной фумаролы в активном кратере. В первой трети фазы произошло увеличение интенсивности парогазовой деятельности, высота подъема парогазовой колонны достигала более 2000 м над кратером. В районе новой высокотемпературной фумаролы регистрировались термальные аномалии и отмечалось свечение в темное время суток.

Фаза IV характеризуется средними значениями отношения А/Т ≈ 0.36 мкм/с, а также термальными аномалиями и интенсивными парогазовыми эмиссиями с высотой более 2000 м над кратером. В течение этой фазы зарегистрировано наибольшее количество сейсмических событий I-IV типов и низкочастотных серий. В августе 2013 г. произошло резкое увеличение числа событий IV типа (рис. 2Г), что может служить признаком изменения режима активности вулкана Горелый.

Важными задачами при изучении сейсмического режима в районе влк. Горелый и разработки методов предсказания его извержений являются: 1- расширение сети сейсмических станций в районе Мутновско-Горелой группы вулканов и 2 - создание специального годографа района влк. Горелый для уточнения основных параметров вулканических землетрясений.

Список литературы

1. Гаврилов В.А. Вулканическое дрожание и землетрясения вулкана Горелый в период извержения 1980-1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1984. № 6. С. 3-17.
2. Гаврилов В.А., Иванов В.В., Трухин Ю.П. и др. Активизация вулкана Горелый в августе-сентябре 1984 г. // Вулканология и сейсмология. 1986. № 5. С. 90-92.
3. Гарбузова В.Т., Соболевская О.В. Обновленная классификация вулканических землетрясений П.И. Токарева // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. II регион. науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2010. С. 25-29.
4. Гирина О.А., Маневич А.Г., Ушаков С.В. и др. Активность вулканов Камчатки в 2011 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Матер. регион. конф. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 20-25.
5. Кирсанов И.Т., Озеров А.Ю. Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый в 1980-1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 25-42.
6. Сеньюков С.Л., Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю. Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3-11.
7. Сеньюков С.Л., Балеста С.Т., Гонтовая Л.И. и др. Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ) // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 43-56.
8. Соболевская О.В. Сейсмичность вулкана Горелый в 1984-2009 гг. // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Матер. региональн. конф. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2009. С. 382-386.
9. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 163 с.
10. Федотов С.А., Кузин И.П. Скоростной разрез верхней мантии в области Южных Курильских островов // Изв. АН СССР. Серия геофиз. 1963. № 5. С. 670-686.
11. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке на пороге 50-летия // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. науч.-техн. конф. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 35-42.