

О ВОЗМОЖНОСТИ УСПЕШНОГО ПРОГНОЗА ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ. СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭТИХ ВУЛКАНОВ

Сенюков С.Л.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский, ssl@emsd.ru

Введение и постановка задачи

Вулкан Безымянный – координаты вершины: 55° 58' с.ш., 160° 35' в.д. Абсолютная высота вулкана 2869 м. После 1000-летней паузы на вулкане Безымянный произошло катастрофическое извержение (VEI-5) 30 марта 1956 г. После этого события на вулкане 1-2 раза в год происходят взрывные извержения с высотой пепловых выбросов до 15 км над уровнем моря. С 1956 г. и до конца 20 века перед некоторыми извержениями были зафиксированы сейсмические предвестники в виде роев поверхностных землетрясений, но официально не было спрогнозировано ни одно извержение этого вулкана по сейсмическим данным. По литературным источникам зафиксирован один удачный краткосрочный прогноз для извержения 29 июня 1985 г. по визуальным наблюдениям «автоэксплозивных лавин» (при отсутствии сейсмических предвестников), автор – Малышев А.И. [1].

Камчатский филиал Геофизической службы (КФГС) РАН начал мониторинг активности вулканов Камчатки в 2000 г. (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) по сейсмическим, спутниковым, визуальным и видео наблюдениям [2]. С февраля 2000 г. по февраль 2004 г. было зарегистрировано и изучено 7 извержений вулкана Безымянный. В результате исследований в мае 2004 г. был определен первый вариант алгоритма прогноза взрывных извержений этого вулкана по сейсмическим и спутниковым данным [3]. Алгоритм совершенствовался по мере накопления опыта и изучения новых извержений. Применение алгоритма в режиме реального времени позволило сделать 7 успешных краткосрочных прогнозов (6 из них зарегистрировано в Камчатском филиале Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска) взрывных извержений из 8, произошедших в период с июня 2004 г. по апрель 2009 г.

Пропуск извержения, произошедшего 14-15 октября 2007 г., заставил задуматься над вопросом: «Каким образом нужно изменить алгоритм, чтобы не было пропущенных извержений?». С подробным описанием последнего варианта алгоритма прогноза и его реализацией в режиме реального времени можно ознакомиться в работе [3]. Для ответа на этот вопрос был проведен ретроспективный анализ предвестников 16 взрывных извержений вулкана Безымянный (с 1999 г. по 2008 г.) и их сопоставление с различными параметрами сейсмичности вулкана Ключевской, который расположен на расстоянии 10 км от вулкана Безымянный [4]. В результате исследований планировалось решить следующие задачи:

- 1) оценить возможность прогноза взрывных извержений вулкана Безымянный;
- 2) выработать рекомендации по оценке опасности и по возможности улучшить алгоритм прогноза.

Результаты

В работе [3] было сделано предположение, что магматические системы вулканов Ключевской и Безымянный взаимодействуют, при этом система вулкана Безымянный имеет подчиненное значение. Для доказательства этого предположения необходимо показать, каким образом сейсмичность, предвещающая взрывные извержения вулкана Безымянный, зависит от сейсмичности и состояния вулкана Ключевской.

Для справки: вулкан Ключевской (координаты вершины: 56° 04' с.ш., 160° 38' в.д.) – самый высокий, активный и мощный базальтовый вулкан Курило-Камчатской вулканической области. Абсолютная высота вулкана ~ 4750 м. В течение 1999-2008 гг. на Ключевском произошло 4 продолжительных извержения в центральном кратере с мощными пепловыми выбросами и излияниями лавовых потоков.

Для периода 1999-2008 гг. сейсмичность вулкана Ключевской превышала сейсмичность вулкана Безымянный по количеству и энергии землетрясений, а также по продолжительности и силе вулканического дрожания на несколько порядков. Было проведено сопоставление различных параметров сейсмичности Безымянного с параметрами Ключевского. Наиболее интересные результаты были получены при сопоставлении землетрясений 4 типа по классификации Токарева П.И. [6]. Следует отметить, что по нашей интерпретации для вулкана Ключевской землетрясения 4

типа – это в основном взрывы дегазирующей магмы в постройке вулкана, а для вулкана Безымянный – это не только взрывы дегазирующей магмы, но и сход лавин.

В начале исследований сейсмические предвестники 16 эксплозивных извержений вулкана Безымянный были разделены по силе и продолжительности на 4 группы (таблица). Для удобства последующего анализа каждому эксплозивному извержению был присвоен порядковый номер в соответствии с датой события и присвоен код по предваряющей сейсмичности (рис. 1, таблица).

Таблица. – Описание групп сейсмических предвестников эксплозивных извержений вулкана Безымянный.

Номер группы (количество извержений)	Описание предваряющей сейсмичности	Код по сейсмичности	Даты и порядковые номера извержений	Амплитуда дрожания на Ключевском по с/ст. CIR
1 (6)	Наиболее продолжительная (7÷14 дней) и наиболее интенсивная (>35 землетрясений 4 типа в сутки)	XXXX	13.03.2000 – 2) 30.10.2000 – 3) 15.12.2001 – 5) 18.06.2004 – 9) 11.01.2005 – 10) 09.05.2006 – 12)	A/Tcp = 0 A/Tcp = 0 A/Tcp < 0.1 A/Tcp < 0.1 A/Tcp = 0 A/Tcp = 0
2 (4)	Продолжительность – 3÷7 дней, интенсивность – до 35 землетрясений 4 типа в сутки накануне извержения	XXX	24.02.1999 – 1) 06.08.2001 – 4) 30.11.2005 – 11) 24.12.2006 – 13)	0.1 < A/Tcp < 0.3 A/Tcp = 0 A/Tcp = 0 A/Tcp = 0
3 (4)	Продолжительность - очень короткая (1÷2 дня), интенсивность - очень слабая (1÷10 землетрясений 4 типа в сутки)	XX	25.12.2002 – 6) 26.07.2003 – 7) 14.10.2007 – 15) 19.08.2008 – 16)	0.1 < A/Tcp < 0.3 0.1 < A/Tcp < 0.75 0.1 < A/Tcp < 0.2 0.1 < A/Tcp < 0.3
4 (2)	Отсутствует, из-за невозможности регистрации при сильном извержении вулкана Ключевской	X	13.01.2004 – 8) 11.05.2007 – 14)	1.5 < A/Tcp < 7.0 9 < A/Tcp < 17

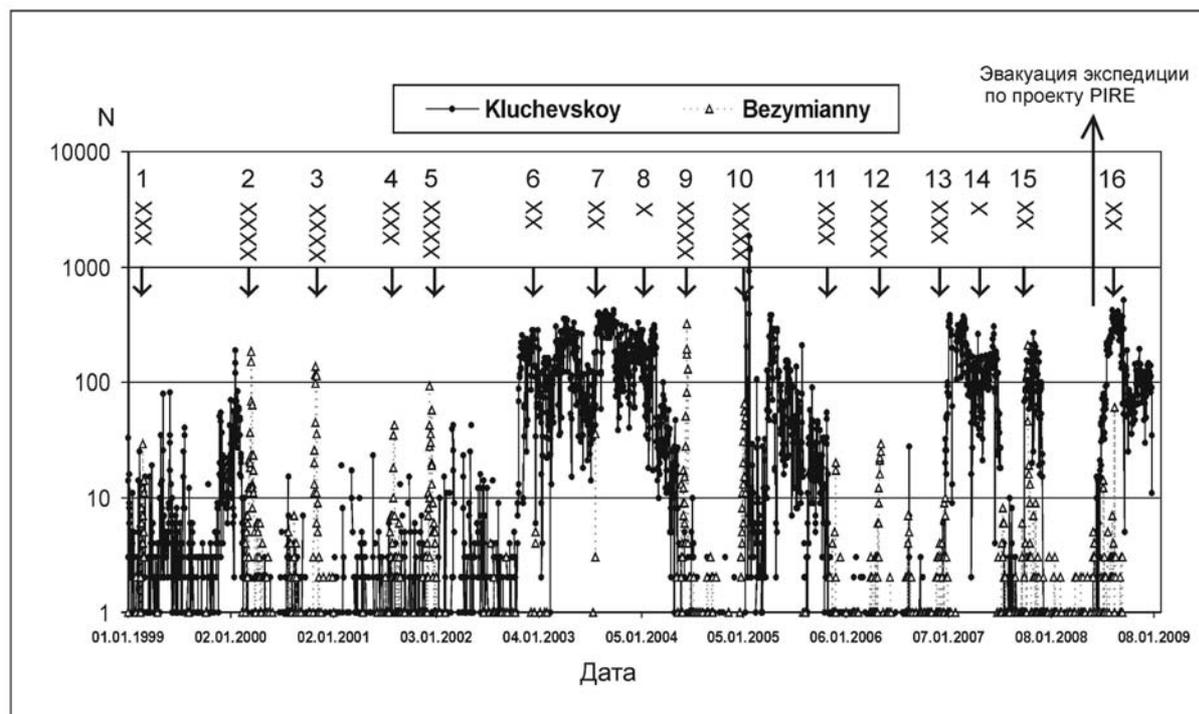


Рис. 1. График сопоставления количества землетрясений 4 типа вулканов Ключевской и Безымянный в 1999-2008 гг. Стрелками вниз указаны эксплозивные извержения вулкана Безымянный с порядковыми номерами из таблицы.

На рис. 1 представлено общее сопоставление землетрясений 4 типа вулканов Ключевской и Безымянный в 1999-2008 гг. На рис. 2, 3 и 4 даны детальные графики для извержений 1, 2 и 3 групп из табл. соответственно.

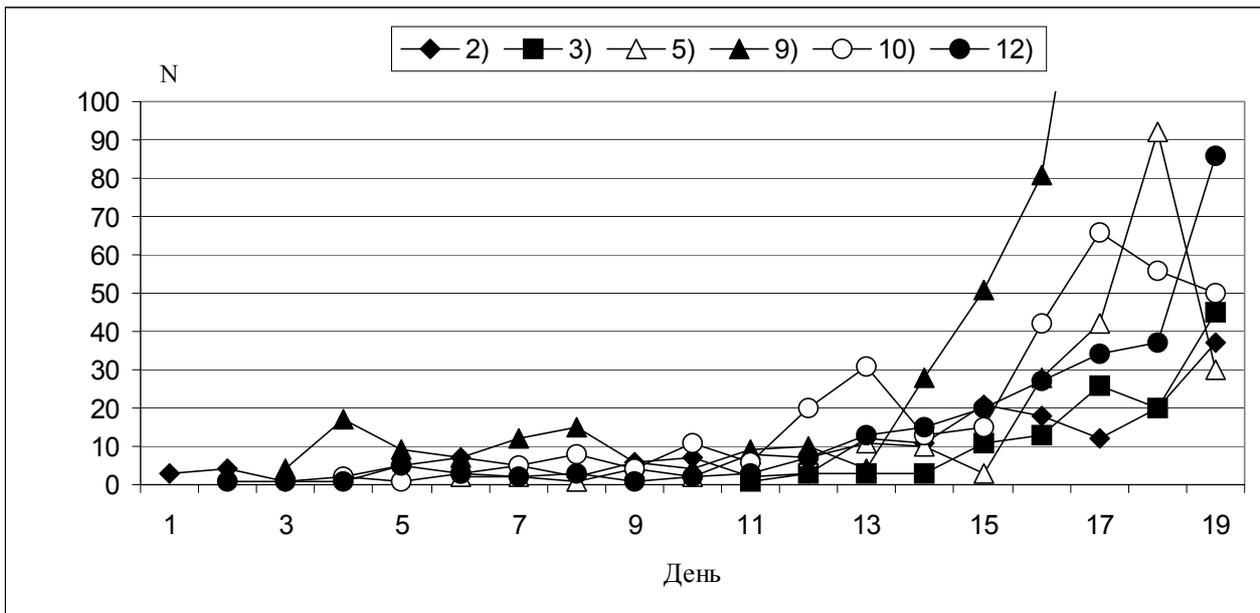
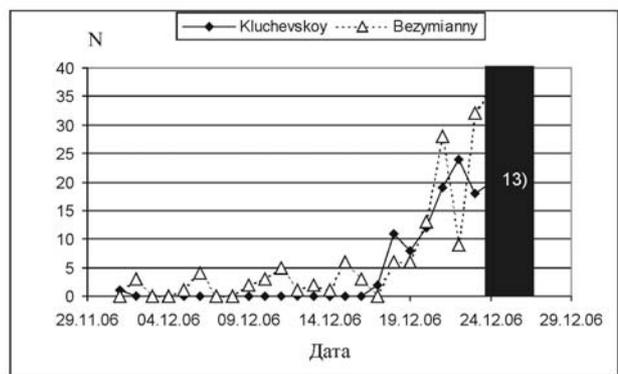
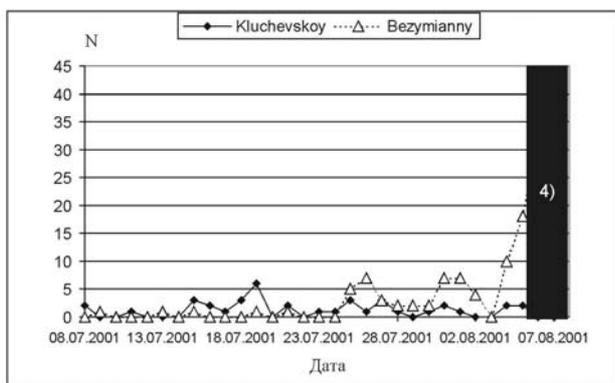
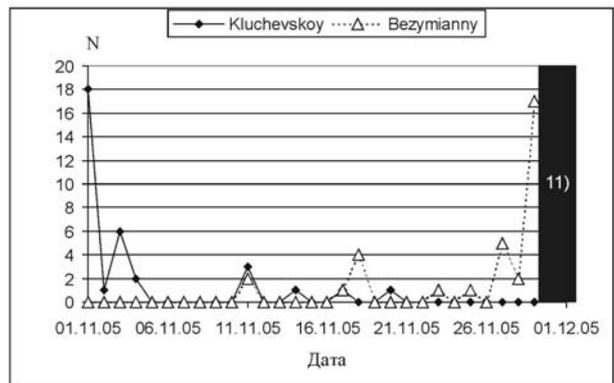
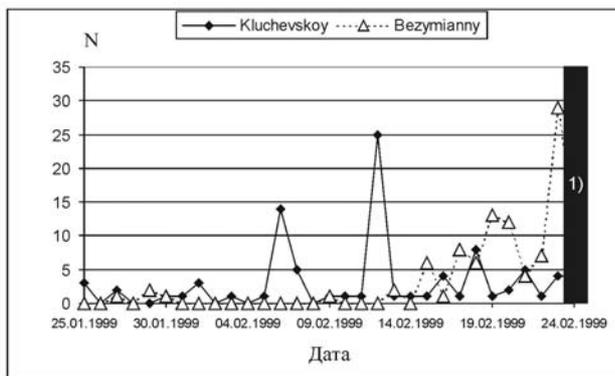
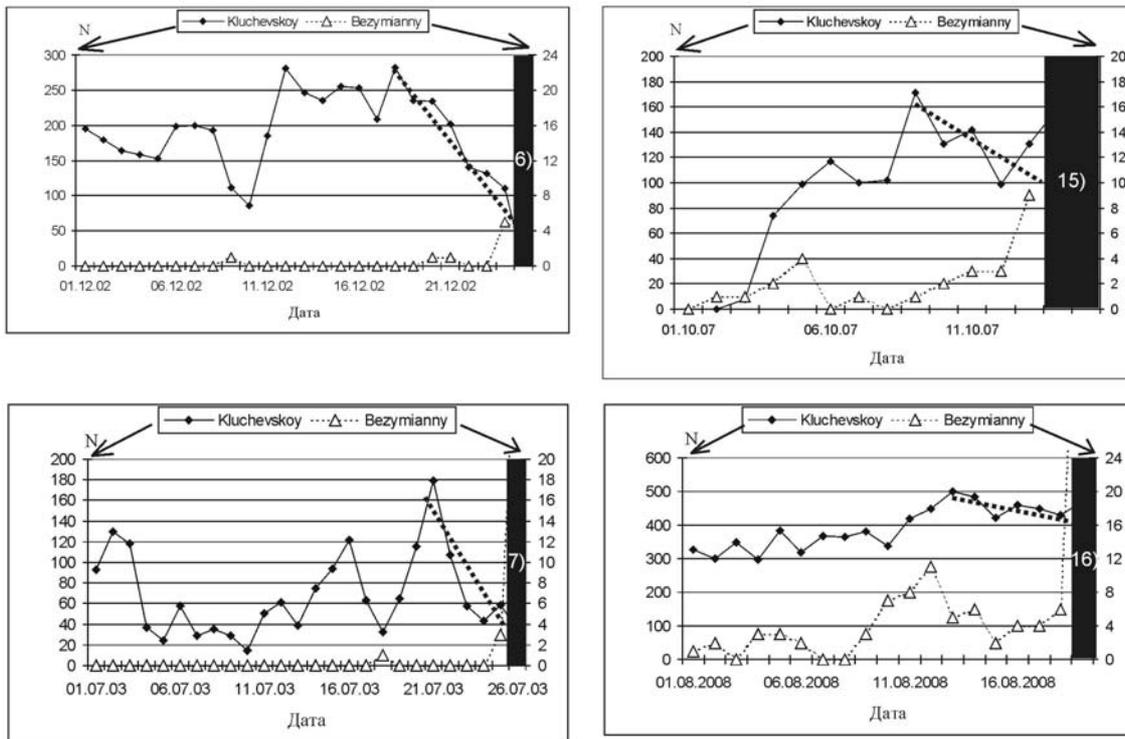


Рис. 2. Графики изменения количества землетрясений 4 типа вулкана Безымянный перед извержениями 1-ой группы из таблицы. В легенде даны порядковые номера извержений из таблицы. В эти промежутки времени на вулкане Ключевской землетрясений 4 типа не зарегистрировано.



4) - извержение Безымянного и его порядковый номер

Рис. 3. Графики изменения количества землетрясений 4 типа вулканов Ключевской и Безымянный перед извержениями Безымянного 2-ой группы из таблицы.



7) - извержение Безымянного и его порядковый номер

Рис. 4. Графики изменения количества землетрясений 4 типа вулканов Ключевской и Безымянный перед извержениями Безымянного 3-ей группы из таблицы.

Из сопоставления землетрясений 4 типа вулканов Ключевской и Безымянный можно сделать следующие выводы:

- 1) наиболее продолжительная (7÷14 дней) и относительно сильная (более 35 землетрясений 4 типа в сутки) сейсмическая подготовка перед извержениями Безымянного наблюдалась в тех случаях, когда на вулкане Ключевской не было землетрясений 4 типа – 6 случаев (рис. 2);
- 2) если на вулкане Ключевской наблюдалась слабая активность (до 25 землетрясений 4 типа за сутки), то сейсмическая подготовка перед извержениями Безымянного продолжалась 3÷7 дней и достигала 35 землетрясений 4 типа в сутки накануне извержения – 4 случая (рис. 3);
- 3) если вулкан Ключевской был активен (50÷500 землетрясений 4 типа за сутки), то сейсмическая подготовка перед извержениями Безымянного была наиболее короткая (1÷2 дня) и слабая (3÷10 землетрясений 4 типа в сутки) – 4 случая (рис. 4);
- 4) сейсмические предвестники извержений Безымянного невозможно зарегистрировать, если вулкан Ключевской находится в стадии извержения – 2 случая.

Из перечисленных выше выводов, можно сделать общее заключение, что существует зависимость между сейсмичностью (землетрясения 4 типа), предваряющей эксплозивные извержения вулкана Безымянный и сейсмичностью (землетрясения 4 типа), отражающей состояние вулкана Ключевской.

Попробуем дать возможное объяснение отмеченной зависимости. Предположим, что количество газовых взрывов (землетрясения 4 типа) на вулкане Ключевской прямо пропорционально абсолютному уровню магмы в постройке вулкана. То есть, чем выше уровень магмы в постройке вулкана, тем меньше давление и тем сильнее процесс дегазации магмы, и тем больше землетрясений 4 типа. Напомним, что кратер Ключевского расположен на высоте 4750 м над уровнем моря, в то время как высота купола вулкана Безымянный не превышает ~3000 м над уровнем моря. Таким образом, разница высот составляет около 2 км при удаленности только 10 км. Большое количество землетрясений 4 типа на Ключевском соответствует состоянию, когда магма находится на уровне его кратера, это подтверждается визуальными наблюдениями и наблюдением термальной аномалии из космоса. В таком случае, магматическая колонна высотой около 2 км создает очень большое избыточное давление в его нижней части, что может вызвать разрушение ослабленных зон в окружающих магматическую систему горных породах и отток магмы с последующим понижением ее уровня. На рис. 4 можно отметить, что перед всеми 4 извержениями вулкана Безымянный (3 группа) наблюдалось резкое уменьшение количества землетрясений 4 типа на Ключевском (в среднем на 100

событий за сутки) в течение 7 дней. Такое уменьшение числа землетрясений можно объяснить оттоком магмы из системы Ключевского в систему Безымянного. Такой отток провоцирует извержения вулкана Безымянного практически без сейсмической подготовки. Здесь нужно отметить, что по литературным данным [5] базальтовая магма вулкана Ключевской при одинаковых температуре и давлении, скорее всего, будет иметь немного большую плотность и меньшую вязкость, чем андезитовая или андезито-базальтовая магма вулкана Безымянный. Поэтому при попадании магмы Ключевского в систему Безымянного, базальтовая магма будет стремиться к опусканию в более легкой среде, и не будет существенно влиять на продукты извержения Безымянного. Но такое перетекание может дать дополнительный (вероятнее всего высокотемпературный) импульс для эксплозивного извержения Безымянного. За несколько дней перед извержениями 15 и 16 на рисунке 4 наблюдались повышенные температуры термальной аномалии Безымянного при очень слабой сейсмичности (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Перед извержениями 6 и 7 тоже было зафиксировано увеличение термальной аномалии, но измерить ее температуру в те годы не было возможности.

Заключение

В результате анализа сейсмических данных 16 извержений вулкана Безымянный в 1999-2008 гг. показано, что существует зависимость между сейсмичностью (землетрясения 4 типа), предвещающей эксплозивные извержения вулкана Безымянный и сейсмичностью (землетрясения 4 типа), отражающей состояние вулкана Ключевской. Дано возможное объяснение этой зависимости. Для мониторинга в режиме реального времени и оценки опасности эксплозивного извержения можно дать следующие рекомендации:

- 1) Оценку опасности эксплозивного извержения вулкана Безымянный нужно начинать с оценки активности вулкана Ключевской.
- 2) Если количество землетрясений 4 типа на вулкане Ключевской меньше 25 событий в сутки и амплитуда дрожания не превышает 0.1 мкм/с по станции CIR, то можно успешно спрогнозировать эксплозивное извержение вулкана Безымянный по сейсмическим и спутниковым данным с использованием предложенного ранее алгоритма [3].
- 3) Если количество землетрясений 4 типа на вулкане Ключевской больше 25 событий в сутки и амплитуда дрожания превышает 0.1 мкм/с по станции CIR, то сейсмическая подготовка перед эксплозивным извержением вулкана Безымянного может быть очень слабой, или ее невозможно будет зарегистрировать в случаях, когда Ключевской извергается, и амплитуда его дрожания превышает 1 мкм/с по станции CIR. В таких случаях можно сделать прогноз эксплозивного извержения вулкана Безымянный только по повышению температуры термальной аномалии на его куполе. Но успех такого прогноза очень сильно зависит от погодных условий, так как если облачность закроет вулкан, то спутниковые наблюдения будут невозможны. Повышенное значение температуры термальной аномалии (Тан.-Тфон > 300 С) может наблюдаться в период от 1 до 10 дней до извержения. Следует отметить, что в некоторых случаях повышение температуры может быть следствием обвала части купола с обнажением горячего материала или выжимания лавового потока, но не предвестником эксплозивного извержения. В заключение хотелось бы обратить внимание на тот факт, что ближайший к вулкану Безымянный побочный прорыв вулкана Ключевской произошел 1956 г. [7], возможно, не случайно.

Список литературы

1. Малышев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 260 с.
2. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000-2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 68-78.
3. Сеньюков С.Л. Результаты применения алгоритма прогноза извержений вулкана Безымянный в 2004-2007 гг. в режиме реального времени // Труды конференции «Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России», 11-17 ноября 2007 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 2. С. 59-63.
4. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина С.Я. Пространственно-временной анализ землетрясений вулкана Ключевской за 1999-2007 гг. // Труды конференции «Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России», 11-17 ноября 2007 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 1. С. 120-124.
5. Слезин Ю.Б. Механизм вулканических извержений (стационарная модель). М.: Научный мир, 1998. 127 с.
6. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М: Наука, 1981. 164 с.
7. Хренов А.П., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т. и др. Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 106-145.