

III

Сейсмичность вулканов и оценка вулканической активности

УДК 550.34+551.21

МОНИТОРИНГ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ ДИСТАНЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ НАБЛЮДЕНИЙ

С. Л. Сеньюков

*Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН
г. Петропавловск-Камчатский*

Аннотация. КОМСП ГС РАН проводит мониторинг активности вулканов Камчатки в режиме близком к реальному времени с 2000 г. Наблюдения ведутся по трем направлениям: 1) сейсмический мониторинг; 2) визуальные и видео наблюдения; 3) спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов. Ежедневная работа по сбору, обработке и представлению информации об активности вулканов позволяет своевременно и обоснованно оценивать их состояние и делать выводы о вулканической опасности. Срочная информация о вулканической опасности передается по электронной почте или телефону в штаб ГО и ЧС Камчатской области, АВО (Аляскинскую вулканологическую обсерваторию) и КВЕРТ (Камчатскую группу реагирования на вулканические извержения).

ACTIVITY MONITORING OF THE KAMCHATKAN VOLCANOES USING REMOTE SENSING

S. L. Senyukov

*Kamchatkan Methodical Seismological Department, Geophysical Service, RAS
Petropavlovsk-Kamchatsky*

Abstract. KEMSD GS RAS executes the activity monitoring of the Kamchatkan volcanoes in near real-time regime since 2000. The investigation includes three parts: 1) seismic monitoring; 2) visual and video observation; 3) satellite monitoring. At present time daily collection, processing and presentation the information about volcano activity allow to estimate the volcano condition and the volcano danger. Urgent information about danger volcanic event is passed by e-mail post or phone to Kamchatkan Safety Department, Alaska Volcano Observatory and Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team.

Введение

На территории полуострова Камчатка расположено 29 действующих вулканов. Мониторинг активности действующих вулканов проводится с целью оценки вулканической опасности. Эта работа необходима для своевременного предупреждения населения и административных органов о возможности извержения, для уменьшения последствий катастрофических событий, для обеспечения безопасности авиа-полетов в районе полуострова Камчатка [11,12].

Проблема прогноза извержений вулканов до настоящего времени не решена. Это объясняется многими причинами. Каждый вулкан имеет свои индивидуальные особенности строения магматического аппарата и свою историю деятельности. Для того чтобы делать обоснованные прогнозные оценки необходимо собрать детальные данные и проследить как минимум несколько извержений исследуемого вулкана, что требует не только больших материальных вложений, но и длительного времени.

Мониторинг вулканической активности направлен на предупреждение о вулканической опасности. Таким образом, в первую очередь, ставится задача не определения даты и масштабов будущего извержения, а решается вопрос об активности вулкана и, следовательно, опасен ли он в настоящее время.

Возможность оценки состояния активности вулканов основана на предыдущих результатах их исследований. Первые исследования взаимосвязи активности вулканов с сейсмическими событиями были проведены Г.С. Горшковым [8,9]. Детальный анализ сейсмичности вулканов Ключевской группы был выполнен П.И. Токаревым и В. И. Горельчик [6,7, 16-18]. Было определено, что извержению всегда предшествует сейсмическая подготовка. Энергия предшествующих извержению вулканических землетрясений во многих случаях мала. Такие землетрясения могут быть зарегистрированы только при условии работы близкорасположенной сейсмической станции. Предыдущие результаты исследований активных вулканов позволяют предположить, что интенсивность сейсмической подготовки пропорциональна силе готовящегося извержения. Землетрясения, как индикаторы подземных событий, свидетельствуют о происходящих разрушениях в подводящей магматической системе и в постройке вулкана при подъеме магмы. Таким образом, чем интенсивнее глубинные процессы, предвещающие извержение, и соответственно сильнее сейсмическая подготовка, тем более значительное извержение можно ожидать. Процесс подготовки извержения может длиться очень разное время, иногда месяцы, иногда он проходит быстро, в течение суток, но он всегда присутствует. Чем слабее извержение, тем сложнее его предсказать, так как ему предшествует слабая и кратковременная сейсмическая подготовка. Но с другой стороны, оптимизм о возможном предсказании катастрофических извержений как раз основывается на том, что ему будет предшествовать значительная сейсмическая подготовка. И не случайно все удачные прогнозы сильных извержений были сделаны при условии, что извержению предшествовала интенсивная сейсмическая подготовка [10]. Зафиксировать начало пробуждения вулкана и проследить его дальнейшее состояние и есть задача мониторинга вулканической активности.

В настоящее время мониторинг вулканической активности, проводимый КОМСП ГС РАН, основывается на данных трех видов наблюдений:

- сейсмические наблюдения;
- визуальные и видео наблюдения;
- спутниковые наблюдения.

Только ежедневная оперативная работа по сбору, обработке и представлению результатов позволяет своевременно и обоснованно оценивать состояние вулканов и делать выводы о потенциальной вулканической опасности.

Сейсмический мониторинг

Из всех перечисленных выше видов наблюдений сейсмический мониторинг является, безусловно, ведущим методом. За последние годы в обработку землетрясений в районах вулканов были внесены существенные изменения. Все эти изменения были связаны с решением главной задачи — обеспечением обработки вулканических землетрясений в режиме близком к реальному времени.

С историей развития и модернизации сети (а также сбором и хранением информации) можно ознакомиться в соответствующих статьях данного сборника. Отметим только, что в 1996-1998 гг. был произведен качественный скачок в обработке сейсмической информации. В эти годы на приемных центрах радиотелеметрической системы была внедрена цифровая регистрация сейсмических сигналов, были разработаны и внедрены методическое и программное обеспечение обработки сейсмограмм с экрана компьютера. Создание корпоративной сети КОМСП позволило иметь доступ к сейсмическим данным в реальном масштабе времени. Результатом выполненных работ стало создание возможности обработки вулканических землетрясений в режиме близком к реальному времени. С введением цифровой технологии регистрации и обработки сейсмических сигналов энергетический класс обрабатываемых землетрясений понизился в среднем на единицу. Появилась возможность обрабатывать более слабые землетрясения в вулканических районах.

По состоянию на 2004 г. телеметрическая сеть КОМСП позволяет проводить сейсмический мониторинг вулканов Камчатки в реальном режиме времени с разной степенью детальности. Наиболее детальные наблюдения проводятся для Авачинской и Ключевской групп вулканов. На вулканах Шивелуч, Карымский, Горелый и Алаид (с 2003 г.) установлено только по одной станции, что позволяет фиксировать слабые локальные землетрясения, но не позволяет определять их пространственное положение. Для остальных вулканов возможна регистрация только сильных сейсмических событий по удаленным станциям. Что, конечно, недостаточно, так как накопленный опыт свидетельствует о необходимости регистрации слабых землетрясений.

Сеть сейсмических станций в вулканических районах и расположение активных вулканов Камчатки представлены на рис. 1, где также показаны изолинии надёжной регистрации K_s . K_s (и везде далее по тексту) - энергетический класс землетрясений $K_{s1,2}^{\Phi 68}$, определяемый по номограмме С.А. Федотова [19].

В настоящее время все определения параметров землетрясений выполняются с помощью программы Мельникова Ю.Ю. [13]. Важным вкладом в решение проблемы локации гипоцентров вулканических землетрясений было корректное введение в программу построек вулканов, как областей поиска возможных решений. Также была проведена большая работа по уточнению одномерных скоростных моделей вулканов Авача, Корякский, Ключевской, что в итоге позволило получать по ним корректные данные. Методика и результаты уточнения скоростных моделей изложены ниже в разделах посвященных Авачинской и Северной группам вулканов.

В 2002-03 гг. в практику сейсмического мониторинга широко стал внедряться спектральный анализ сейсмических сигналов. В сочетании с видео наблюдениями появилась возможность для создания базы эталонов вулканических событий и сопровождающих эти события сейсмических сигналов. Первые практически значимые результаты использования созданной базы представлены в статье настоящего сборника, посвященной пепловым выбросам вулкана Шивелуч.

Авачинская группа вулканов. Телеметрическая сеть сейсмических станций в районе Авачинской группы вулканов была установлена в 70-х годах прошлого столетия [3]. Мониторинг активности Авачинской группы вулканов в КОМСП был организован в 1991-1992 годах. Анализ первых результатов определений гипоцентров выявил существенные недостатки:

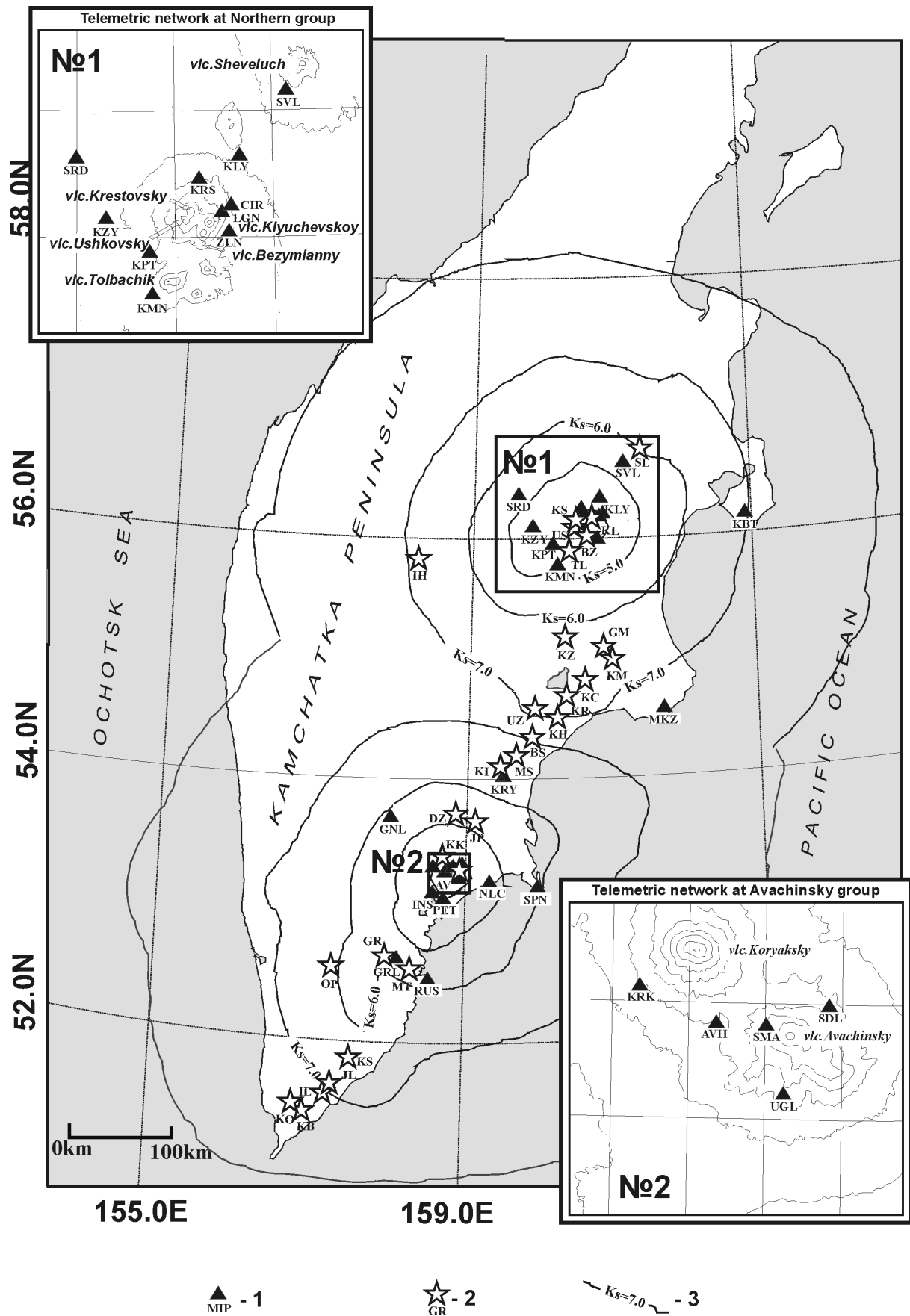


Рис. 1. Карта активных вулканов Камчатки и радиотелеметрических станций с контурами надежной регистрации. На врезках показаны районы Северной группы вулканов (район №1) и Авачинской группы вулканов (район №2).

1 — телеметрическая сейсмическая станция, 2 — вулкан, 3 — контур надежной регистрации.

Код и название вулканов: SL - Шивелуч, KS - Крестовский, KL - Ключевской, US - Ушковский, BZ - Безымянный, TL - Плоский Толбачик, IH - Ичинский, KZ - Кизимен, GM - Гамчен, KM - Комарова, KC - Кроноцкий, KR - Крашенинникова, UZ - Узон, BS - Большой Семьячик, MS - Малый Семьячик, KI - Карымский, DZ - Дзензур, JP - Жупановский, KK - Корякский, AV - Авачинский, GR - Горелый, MT - Мутновский, OP - Опада, KS - Ксудач, JL - Желтовский, IL - Ильинский, KO - Кошелевский, KB - Камбальный.

Код и название телеметрических станций: SVL - «Шивелуч», KLY - «Ключи», SRD - «Срединный», KRS - «Крестовский», CIR - «Цирк», LGN - «Логинов», KPT - «Корыто», KZY - «Козыревск», ZLN - «Зеленая», KMN - «Каменистая», KBT - «Крутоберегово», MKZ - «Мыс Козлова», KRY - «Карымский», GNL - «Ганалы», NLC - «Налычево», SPN - «Шипунский», KRK - «Коряка», AVH - «Авача», SDL - «Седловина», SMA - «Сомма», UGL - «Угловая», PET - «Петропавловск», INS - «Институт», GRL - «Горелый», RUS - «Русская».

Fig. 1. Map of Kamchatka: 1 — telemetric seismic station, 2 — active volcanoes, 3 — contour of sure registration. Square №1 is Northern group of volcanoes; square №2 is Avachinsky group of volcanoes.

Code and name of volcanoes: SL - Sheveluch, KS - Krestovsky, KL - Klyuchevskoy, US - Ushkovsky, BZ - Bezymiaany, TL - Plosky Tolbachik, IH - Ichinsky, KZ - Kizimen, GM - Gamchen, KM - Komarov, KC - Kronotsky, KR - Krashenninnikov, UZ - Uzon, BS - Bolshoi Semiachik, MS - Maly Semiachik, KI - Karymsky, DZ - Dzenzursky, JP - Zhupanovsky, KK - Koryaksky, AV - Avachinsky, GR - Gorely, MT - Mutnovsky, OP - Opala, KS - Ksudach, JL - Zheltovsky, IL - Iliyinsky, KO - Koshelev, KB - Kambalny.

Code and name of telemetric seismic stations: SVL - «Sheveluch», KLY - «Kluchi», SRD - «Sredinny», KRS - «Krestovsky», CIR - «Cirk», LGN - «Loginov», KPT - «Kopyto», KZY - «Kozirevsk», ZLN - «Zelenaya», KMN - «Kamenistaya», KBT - «Krutoberegovo», MKZ - «Mis Kozlova», KRY - «Karymsky», GNL - «Ganaly», NLC - «Nalichevo», SPN - «Shipunsky», KRK - «Koryaka», AVH - «Avacha», SDL - «Sedlovina», SMA - «Somma», UGL - «Uglovaya», PET - «Petropavlosk», INS - «Institute», GRL - «Gorely», RUS - «Russkaya».

- используемый ранее разрез значительно отличался от реального, при наличии уверенных вступлений Р и S волн на близкорасположенных 4-х станциях (рис. 1) гипоцентр для землетрясений из постройки Авачинского вулкана просто не определялся;

- проведенный в статье [4] детальный анализ координат гипоцентров и разницы времен вступления Р- волн на станциях и времени в очаге показал, что точность определения была явно неудовлетворительная.

Поэтому в течение 1996 г были проведены исследования с целью устранения названных выше недостатков. В результате выполненных работ были установлены две одномерные скоростные модели среды для расчета гипоцентров в районе Корякского и Авачинского вулканов. Каждая модель была определена путем перебора большого количества различных моделей при неизменном наборе вступлений Р и S волн более чем от 50 землетрясений. Перебор осуществлялся с учетом минимальных отклонений времен вступлений Р и S волн на всех сейсмических станциях, а также с использованием скоростного разреза полученного с помощью сейсмического просвечивания на профиле, проходящем через Авачинский вулкан [1,5]. Полученные скоростные разрезы представлены на рис. 2. Для Авачинского вулкана модель получилась, как единственно возможная. Для вулкана Корякский модель необходимо уточнять. Для этого требуется установка дополнительных сейсмических станций на северном склоне вулкана. Только в этом случае вулкан Корякский будет расположен внутри приемной сети, что является главным условием для корректного сейсмического мониторинга. Для сейсмических событий, расположенных вне этих двух вулканов, приблизительно по изолинии 400 м, в расчетах используется региональный годограф.

Начиная с 1997 г, землетрясения Авачинской группы ($K_s \geq 4.0$) вулканов обрабатываются в текущем режиме. Землетрясения за 1994-1996 гг. были переобработаны в

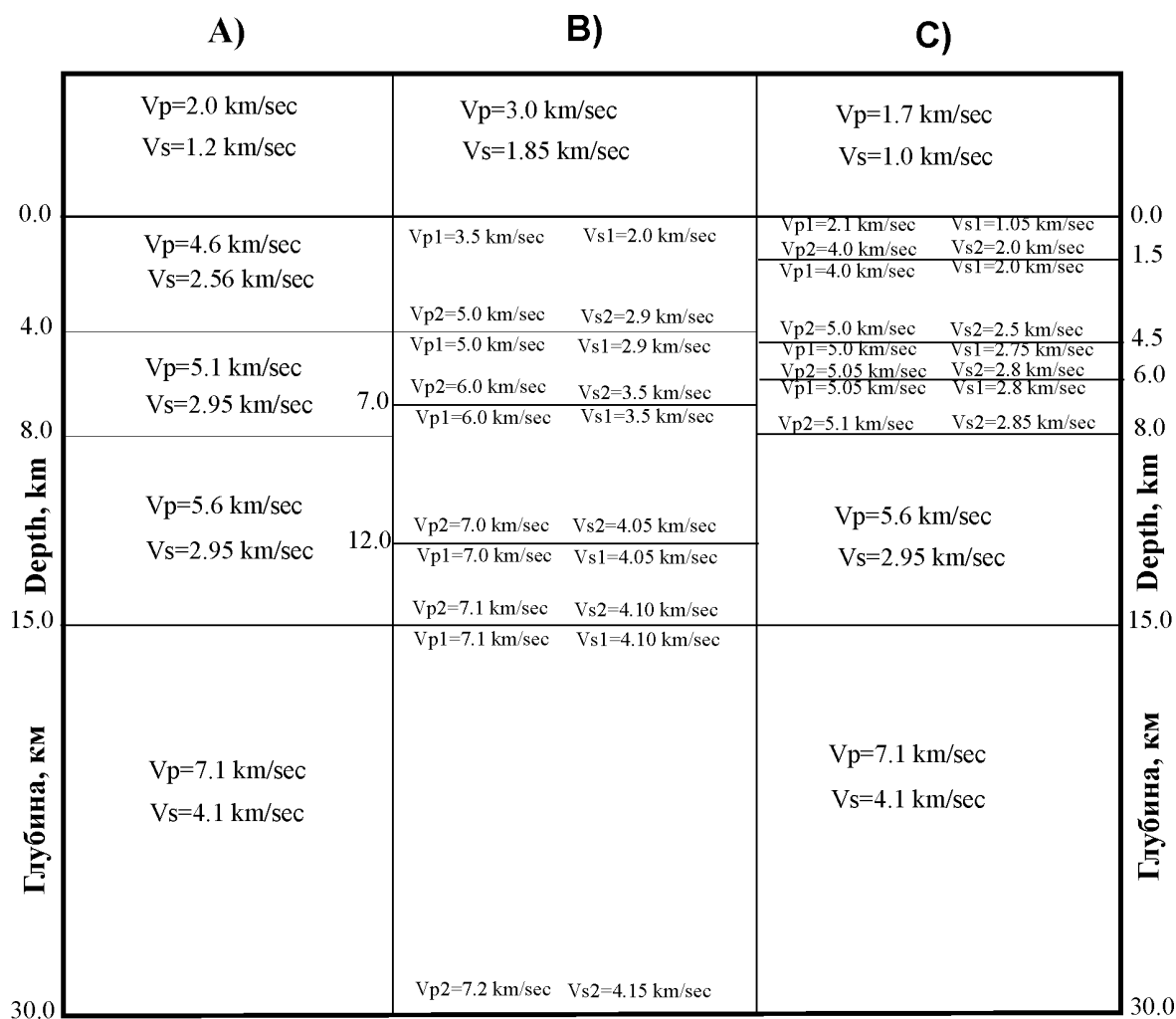


Рис. 2. Скоростные разрезы для Авачинской группы вулканов: А) - старый Авачинский и Корякский (одинаковые); В) - новый Авачинский; С) - новый Корякский.

Vp - скорость Р волны, Vs - скорость S волны, если в слое указаны две скорости (Vp1 и Vp2), то скорость в слое изменяется по линейной зависимости.

Fig. 2. 1 - dimensional velocity models: A) – old model of Avachinsky volcano (and identical model of Koryaksky volcano); B) – new model of Avachinsky volcano; C) – new model of Koryaksky volcano.

Vp - velocity of P wave, Vs - velocity of S wave. If there are two velocities into one layer, it means that the velocity changes from Vp1 to Vp2 according to linear dependence.

соответствии со сложившейся методикой в отложенном режиме. Записи землетрясений на магнитных лентах за 1991-1993 гг. восстановить не удалось.

Таким образом, к настоящему времени в КОМСП имеется однородный каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за период с 1994 по настоящее время, который включает более 1870 землетрясений. Такой продолжительный ряд наблюдений позволил обоснованно и своевременно дать предупреждение перед активизацией Авачинского вулкана в октябре 2001 г.

Данные за текущий год доступны всем пользователям Интернета по адресу - <http://data.emsd.iks.ru/avhquake/index.htm>.

Северная группа вулканов. Сейсмические наблюдения на вулкане Ключевской начались в 1946 г. [8]. Первая телеметрическая станция в районе Северной группы вулканов была установлена в 1981 г. Сотрудники КОМСП начали составлять оперативный каталог землетрясений Северной группы с 1994 г. С 1994 до 1999 года в режиме оперативной обработки с использованием программы Мельникова Ю.Ю. определялись

Таблица 1. Прежние и новые, определенные с помощью GPS, координаты телеметрических сейсмических станций.

Table 1. Old and new (determined by GPS) coordinates of the telemetric seismic stations.

Станции		Широта, в дес. градуса	Долгота, в дес. градуса	Высота над уровнем моря, км	Разница, км (в плане)
SRD	новые	56.316	159.697	0.75	1.242
	старые	56.317	159.717	0.8	
KRS	новые	56.217	160.565	1.12	0.548
	старые	56.214	160.558	1.2	
SVL	новые	56.577	161.22	0.84	0.735
	старые	56.583	161.225	0.9	
KZY	новые	56.066	159.896	0.045	0.510
	старые	56.070	159.900	0.045	
PDK	новые	56.139	160.794	0.985	0.878
	старые	56.14	160.78	0.8	
KLY	новые	56.317	160.858	0.047	0.6
	старые	56.313	160.852	0	
KMN	новые	55.756	160.247	1.15	0.624
	старые	55.76	160.24	1.1	
ZLN	новые	56.017	160.804	1.12	0.112
	старые	56.018	160.804	1.1	

параметры только выборочных землетрясений, приблизительно около 30%. Остальные землетрясения обрабатывались в отложенном режиме в сотрудничестве с Институтом вулканической геологии и геохимии при помощи программы Сургучева П.И. [15, 20].

Существенным недостатком в определении параметров гипоцентров в режиме оперативной обработки было то, что при очевидной по визуальным данным активности в кратере Ключевского вулкана, глубина гипоцентров землетрясений всегда получалась не выше уровня моря. То есть землетрясений в постройке вулкана не было, что вызывало обоснованное недоверие.

В течение 1997-1998 были проведены исследования одномерных скоростных разрезов (рис. 3). В результате перебора большого количества моделей, на основе минимизации невязок вступлений от набора землетрясений с уверенными временами вступлений Р- и S- волн, и после экспериментального опробования была выбрана модель В на рис. 3, как наиболее удачная. Но тестирование полученных результатов программой INV1 Хироки Миямачи [21, 24, 25] (Университет Кагошима, Япония) показало на некорректность данных. Времена вступлений, скоростной разрез, координаты гипоцентров землетрясений и координаты станций не увязывались в рамках единой модели. Тогда было сделано предположение о неточности в определениях координат станций, что и было доказано последующими измерениями с помощью приборов GPS (точность не хуже 100м) в 1999-2000 гг., табл. 1. Ошибки предыдущих определений в плане в среднем составили 500-600 м, что могло составлять до 10% от расстояния до возможного эпицентра. Внедрение в обработку новых координат станций в 2000 г. и использование данных от установленных в течение 1998-1999 г. новых радиотелеметрических станций KPT, CIR и LGN, рис. 1, значительно улучшило обработку землетрясений в районе Северной группы вулканов.

Тестирование вышеупомянутой программой INV1 результатов обработки за первые три месяца 2000 г. показало хорошие результаты. Так по временам вступлений продольных волн от 750 событий (ограничение программы) был получен одномерный скоростной разрез – модель С (рис. 3), который в целом не противоречит результатам сейсмического просвечивания Ключевской группы вулканов 1986-1987 г [2] и

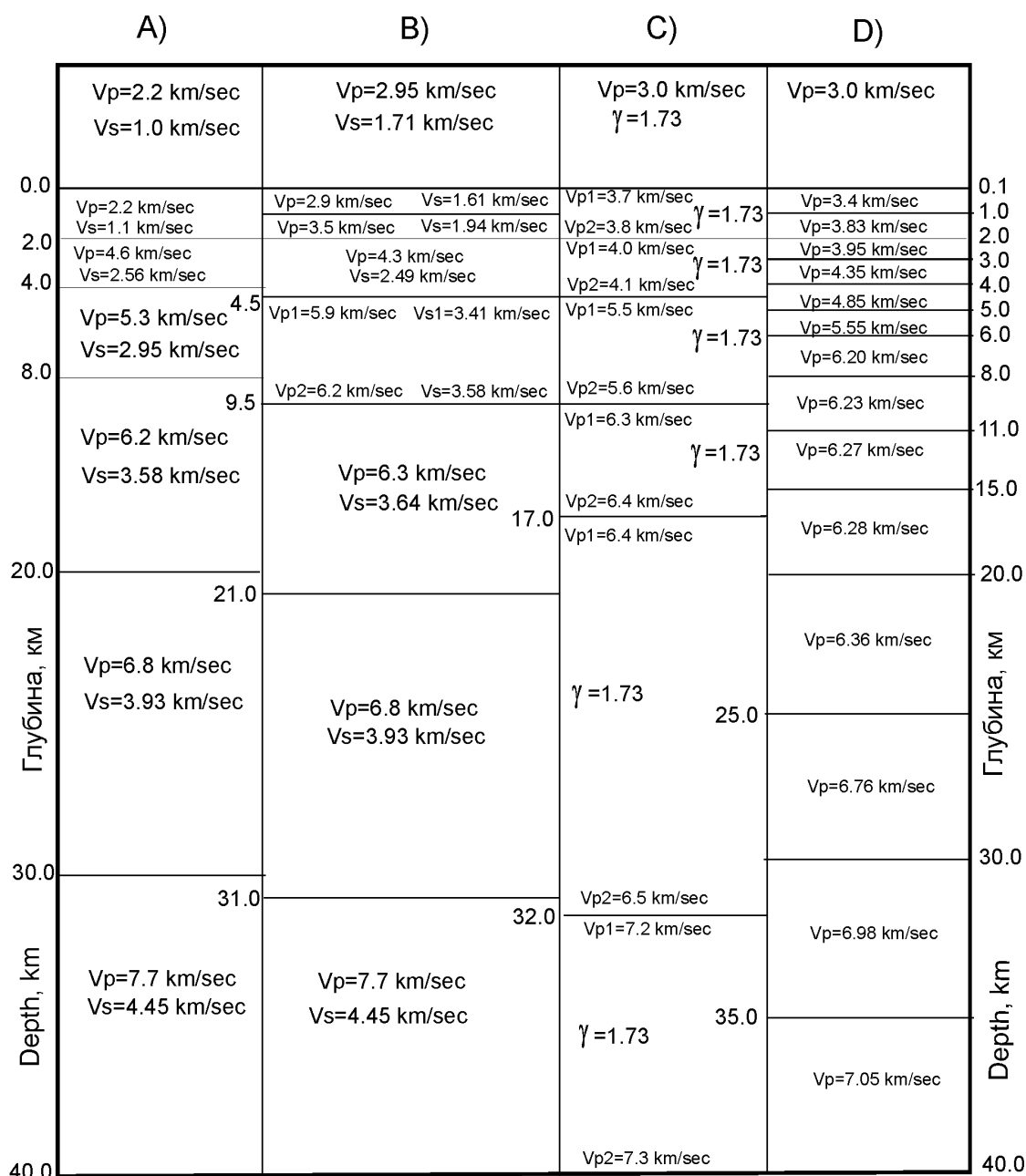


Рис. 3. Скоростные модели для Северной группы вулканов: А) – модель, используемая до 1996 г; В) – новая базовая модель, используется с 1999 г по настоящее время; С) – модель рассчитанная по программе INV1; D) – модель рассчитанная по программе Кисслинга.

Vp- скорость Р волны, Vs - скорость S волны, i – отношение скоростей Vp к Vs, если в слое указаны две скорости (Vp1 и Vp2), то скорость в слое изменяется по линейной зависимости.

Fig. 3. 1-dimensional velocity models: A) – old model was used till 1996; B) – new present model ; C) – model was determinated by INV1 program; D) – model was determinated by program of Kissling.

Vp- velocity of P wave, Vs – velocity of S wave, $i = Vp/Vs$. If there are two velocities into one layer, it means that the velocity changes from Vp1 to Vp2 according to linear dependence.

существенно отличается от разреза используемого до 1996 г. [15] (модель А, рис. 3). Результат был получен при устойчивой сходимости, что свидетельствует о корректности входных данных. Введение нового разреза С (рис. 3) в программу Мельникова Ю.Ю. и расчеты для 2042 вступлений Р- волн от 308 землетрясений, произошедших в феврале 2000 г, уменьшило среднеквадратическую невязку с 0.420 сек до 0.3647 сек, т.е. на

15%. Но так как землетрясения за первые три месяца происходили в значительной мере (около 90 %) в районе вулкана Ключевской, то и полученную модель С (рис. 3) можно отнести в большей мере к району Ключевского вулкана. Таким образом, модель В (рис. 3), координаты станций из таблицы 1 и, получаемые с помощью программы Мельникова Ю.Ю., координаты гипоцентров укладываются в одну непротиворечивую модель, которую можно считать базовой для расчета гипоцентров для всей Северной группы вулканов. Но для каждого отдельного района, например Толбачинский дол или вулкан Шивелуч, более корректно определить свою скоростную модель по данным землетрясений из этого района. К сожалению, существующая сеть станций для этих целей недостаточна.

Правомерность и объективность принятого подхода была дополнительно доказана путем применения другой методики. В начале 2004 г. была определена одномерная скоростная модель района Ключевского вулкана по данным 2003 г. [22] с использованием программ Кисслинга Е. [23]. Проведенные исследования показали следующее:

- данные по Северной группе вулканов корректные и высокого качества, сообщение Кисслинга Е.;

- полученная при устойчивой и быстрой сходимости одномерная скоростная модель D (рис. 3) имеет незначительные отличия от моделей В и С, но имеет существенные отличия от модели А в верхней части разреза;

- для постройки вулкана выше уровня моря определена скорость Р- волны 3 км/сек, что было ранее получено для вулканов Авачинский и Карымский [14].

Таким образом, к началу 2000 г были созданы условия для оперативной обработки землетрясений Северной группы вулканов. Начиная с этого времени, все землетрясения Северной группы обрабатываются в оперативном режиме в полном объеме без пропусков, в соответствии с представительным уровнем регистрации (рис. 1), и составляется окончательный каталог. В каталоге также присутствует дополнительно большое количество землетрясений, которые имеют класс несколько ниже (в пределах 0.5 класса) уровня надежной регистрации. Если все землетрясения невозможно было обработать в условиях мощного роя, то они помещались в каталог с параметрами по аналогии с другими землетрясениями роя. Координаты таких событий вносились в каталог искусственно и обычно приравнивались координатам вулкана. Такие землетрясения легко обнаружить в каталоге, так как они имеют нулевое значение секунд в графе «время в очаге». До настоящего времени искусственно было внесено в каталог только некоторое количество землетрясений двух роев: 1) вулкана Шивелуч в апреле 2001 г; 2) вулкана Безымянный в декабре 2002.

Землетрясения за 1999 г были пересчитаны в соответствии с настоящей методикой, а землетрясения за 1997 и 1998 гг. находятся в стадии переработки.

В оперативном режиме выполняется также традиционная обработка землетрясений с разделением по типам (в соответствии с классификацией П.И. Токарева [18]) и определением их количества и суммарного отношения А/Т.

С результатами обработки сейсмической информации для вулканов Безымянный и Шивелуч за 2000–2003 гг. можно ознакомиться в другой статье данного сборника. Всего за эти годы было обработано около 24500 землетрясений Северной группы вулканов. Данные за текущий год доступны всем пользователям Интернета по адресу - <http://data.emsd.iks.ru/klyquake/index.htm> .

Визуальные и видео наблюдения

Огромное значение для наблюдений за вулканической активностью имеют визуальные данные. В настоящее время сбор, хранение и представление данных наблюдений за вулканами Камчатки (доступными для визуального контроля) осуществляется сотрудниками приемных центров Ключи, Козыревск, Петропавловск-Камчатский два раза в день. В случае активизации наблюдения учащаются. Также по возможности

собираются визуальные данные очевидцев в случае их поступления в течение текущих суток. Все собранные данные доступны пользователям на странице КОМСП в Интернете по адресу - <http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>.

Качественный скачок в обеспечении визуальными данными произошел с появлением непрерывных видео наблюдений с точной привязкой их к абсолютному времени (точность ± 1 секунда обеспечивается GPS приемником). Первая видеокамера была установлена 09 октября 2000 г на приемном центре телеметрической системы в г. Ключи для наблюдений за вулканом Ключевской. Начиная с этого дня, изображение Ключевского вулкана стало доступно в Интернете в режиме реального времени (<http://data.emsd.iks.ru/video/video.htm>). Ведется архив видео снимков на лазерных дисках с дискретизацией 1 минута. Кроме того, суточный буфер позволяет создавать видеофильмы с дискретизацией 1 секунда. Вторая аналогичная система видео наблюдений за вулканом Шивелуч заработала 17 мая 2002 г (<http://data.emsd.iks.ru/videosvl/videosvl.htm>). За вулканом Безымянный видео наблюдения начаты 20 августа 2003 г с приемного центра в п. Козыревск (<http://data.emsd.iks.ru/videokzy/videokzy.htm>). Программное обеспечение для получения, хранения, представления в Интернете и создания видео фильмов было создано Кискиным Д.Ю.

Спутниковый мониторинг

До 2002 г. спутниковая информация предоставлялась сотрудникам КОМСП Аляскинской вулканологической обсерваторией (АВО) в рамках договора по безопасности полетов. Начиная с 16 сентября 2002 г, обработка информации приемника AVHRR спутника NOAA16 проводится в лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) КОМСП.

Камчатский центр связи и мониторинга (КЦСМ) обеспечивает получение данных спутников серии NOAA на базе приемной станции «Smartrack» (Франция). С 17 марта 2002 г., по мере поступления, КЦСМ выставляет файлы приемника AVHRR (5 каналов) спутника NOAA16 на своем сайте (<http://www.kccm.ru/>) в автоматическом режиме. Все принятые станцией первичные файлы формата “.11f” и обзорные снимки к ним хранятся на сайте КЦСМ в режиме “ONLINE” в течение месяца, после чего записываются на DVD носители. С 25 апреля 2003 г. на этом же сайте аналогичные данные выставляются для спутника NOAA17. В КОМСП данные передаются в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве по некоммерческому использованию спутниковой информации. Сотрудники ЛИСВА ежедневно копируют первичные файлы формата “.11f” по каналам Интернет.

На рис. 4 представлена в качестве примера схема покрытия изучаемого района спутниковыми снимками, принятыми 04 февраля 2004 г приемным центром КЦСМ. Схема показывает, что Камчатка и Курильские острова ежедневно регистрируются на 4-6 снимках, Аляска и Алеутские острова — на 2 снимках.

Снимки обрабатываются ежедневно с помощью демонстрационной программы ReadHRPT. В результате обработки в соответствии со сложившейся в мире методикой [26] определяются следующие параметры для термальных аномалий и пепловых шлейфов на вулканах.

Термальная аномалия:

- наличие или отсутствие аномалии;
- если аномалия присутствует, то определяется размер аномалии в пикселях;
- для аномалий дополнительно определяется интенсивность на качественном уровне — слабая или интенсивная, точное значение температуры в данном варианте программы не определяется.

Пепловый шлейф:

- наличие или отсутствие шлейфа;
- если шлейф присутствует, то определяется наличие пепла в шлейфе по известной методике вычитания данных 5 канала из данных 4 канала;

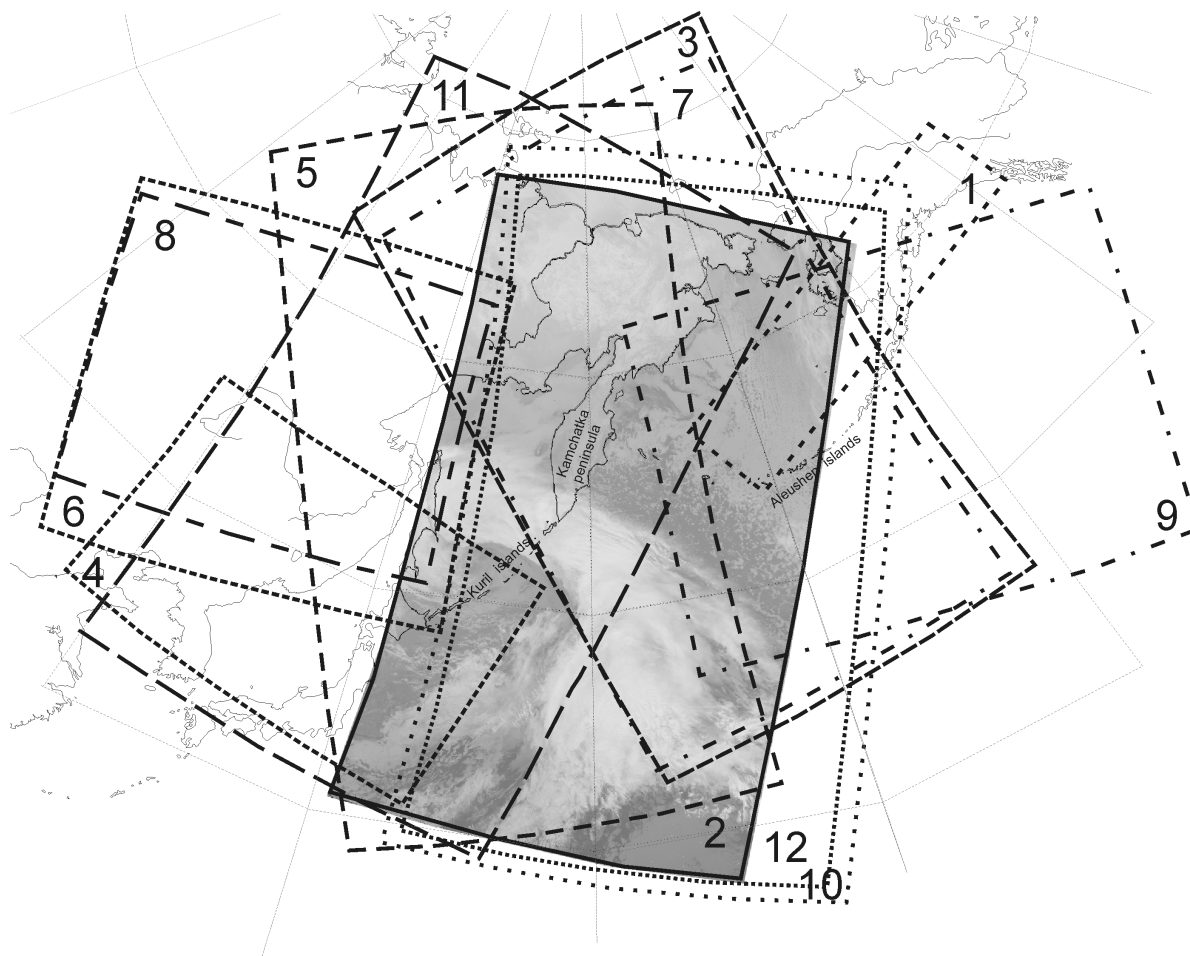


Рис. 4. Схема покрытия зоны снимками спутников NOAA16 и NOAA17, полученных 04 февраля 2004:

1 - NOAA16 00:02 UTC; 2 - NOAA17 00:06 UTC; 3 - NOAA16 01:39 UTC; 4 - NOAA17 01:52 UTC;
5 - NOAA16 03:19 UTC; 6 - NOAA16 05:04 UTC; 7 - NOAA17 09:54 UTC; 8 - NOAA17 13:18 UTC;
9 - NOAA16 13:56 UTC; 10 - NOAA16 15:35 UTC; 11 - NOAA16 17:16 UTC; 12 - NOAA17 23:42 UTC.

Для снимка 2 представлено обзорное изображение по 4 каналу.

Fig. 4. The images of NOAA16 and NOAA17 satellite were received at February 04, 2004:

1 - NOAA16 00:02 UTC; 2 - NOAA17 00:06 UTC; 3 - NOAA16 01:39 UTC; 4 - NOAA17 01:52 UTC;
5 - NOAA16 03:19 UTC; 6 - NOAA16 05:04 UTC; 7 - NOAA17 09:54 UTC; 8 - NOAA17 13:18 UTC;
9 - NOAA16 13:56 UTC; 10 - NOAA16 15:35 UTC; 11 - NOAA16 17:16 UTC; 12 - NOAA17 23:42 UTC.

Image 2 shows the review image for 4 channel.

- для пепловых шлейфов определяются размеры, протяженность и направление распространения пеплового облака.

Результаты обработки публикуются на странице КОМСП в Интернете по адресам:

- <http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>;

- <http://emsd.iks.ru/~ssl/>.

Дополнительно файлы с изображением Камчатки формата “.11f” сохраняются на CD дисках в архиве. Наиболее информативные снимки сохраняются в формате “.gif” для рассылки и хранения с сохранением разрешения первичного изображения. Снимки за текущий месяц выставляются на сервере: <ftp://emsd.iks.ru/pub/DATA/RTS/Volcanoes/>.

За период наблюдений были успешно обнаружены и отслежены термальные аномалии на вулканах Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Карымский, Чикурачки. Было дано своевременное предупреждение о росте термальной аномалии перед извержениями вулкана Безымянный 26 декабря 2002, 26 июля 2003 г и 13 января 2004 г.

Заключение

Результаты работ по проведению мониторинга вулканической активности в течение 4-х лет состоят в следующем.

1. Создана эффективная система оперативного контроля вулканической активности на территории Камчатки. Собран, обработан и систематизирован большой объем фактического материала по извержениям вулканов Авачинский, Ключевской, Безымянный, Шивелуч, Карымский. Созданы и внедрены в практику расчетов координат гипоцентров землетрясений одномерные скоростные разрезы для Авачинской и Северной групп вулканов.

2. Детальное исследование периодов покоя и активности вулканов позволило достоверно определить понятие фоновой сейсмичности, которая является различной для разных вулканов. Опираясь на понятие фоновой сейсмичности, были сделаны многочисленные опровержения ложных тревог жителей Камчатки об активизации вулканов Авачинский и Мутновский на основании визуальных наблюдений за парогазовой эмиссией.

3. Детальные исследования развития сейсмической активности и термальных аномалий в периоды активизации вулканов позволяют моделировать сценарии их подготовки к извержению.

4. Созданная система контроля вулканической активности в большинстве случаев позволила дать своевременные предупреждения об активизации вулканов, которые закончились извержениями. Так вулкан Безымянный извергался 6 раз за период наблюдений, и только в одном случае не удалось своевременно дать предупреждение. На вулкане Шивелуч наряду с многочисленными кратковременными слабыми и средней силы эксплозивными извержениями в мае 2001 г было зафиксировано мощное эксплозивное извержение, связанное с ростом новых куполов. Тогда пепловая колонна достигла высоты до 20 км над уровнем моря, а длина пирокластического потока достигла 18 км. Этому извержению предшествовала мощная сейсмическая подготовка, которая была обработана в режиме близком к реальному времени. Были также зарегистрированы многочисленные активизации вулкана Карымский, слабые одноразовые проявления активности на вулканах Авачинский и Мутновский, а также длительное усиление активности на вулкане Ключевской.

Список литературы

1. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А.А., Пушкарев В.Г., Сеньюков С.Л. "Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ)" // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 43-56.
2. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А.А., Пак Г., Пушкарев В.Г., Сеньюков С.Л. Результаты сейсмических исследований земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3-19.
3. Гаврилов В.А., Малкин А.П., Чебров В.Н., Сорокин В.В. Радиотелеметрическая система сбора сейсмической информации на Авачинско-Корякском полигоне // Бюл. вулканол. станций. 1978, № 54. С. 22-26.
4. Гонтовая Л.И., Ризниченко О.Ю., Сеньюков С.Л., Степанова М.Ю., Ящук В.В. Об упругих свойствах земной коры в районе Авачинского вулкана на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. №4-5. С.79-87.
5. Гонтовая Л.И., Ефимова Е.А., Костюкевич А.С., Пийп В.Б. Сейсмический разрез вулкана Авачинский по данным КМПВ-ГСЗ // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 3. С. 73-81.
6. Горельчик, В.И., В.М. Зобин, П.И. Токарев, Сейсмичность вулканов, Вулканология и сейсмология, 1987. № 6. С. 61-77.

7. Горельчик В.И., Степанов В.В. Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки в 1971-1972 гг. // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. С. 108-118.
8. Горшков Г.С., Сейсмические наблюдения в селе Ключи (с 28 августа по 31 декабря 1948 г.). Бюллетень вулканологических станций № 19, 1953.
9. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955-1963 гг. М.: Наука, 1965. 172 с.
10. Иванов В.В. Прогнозы крупных извержений вулканов на Камчатке и их оправдываемость // Вестник ДВО РАН. 2003. № 5. С. 97-108.
11. Кирьянов В.Ю. Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной вулканической опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 16-36.
12. Кирьянов В.Ю., Чубарова О.С., Сеньюков С.Л., Евдокимова О.А., Гарбузова В.Т. Группа по обеспечению безопасности полетов от вулканических пеплов (КВЕРТ): 8 лет деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 408-423.
13. Мельников Ю.Ю. Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. 1990. № 5. С. 103-112.
14. Сеньюков С.Л. Скоростные модели вулкана Карымский по данным локальных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 54-63.
15. Сургучев П.И., Горельчик В.И., Левина В.И., Мячкин В.И. Массовое определение гипоцентров землетрясений на ЭВМ в районе Северной группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 50-63.
16. Токарев П.И. Сейсмичность района северной группы вулканов Камчатки. Бюллетень вулканологических станций, 1965. № 39. С. 35-46.
17. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 120 с.
18. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
19. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
20. Чубарова О.С., Сеньюков С.Л., Левина В.И. Вулканические районы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 1994 г, М.: ГС РАН, 2000. С.103-110.
21. Crosson R.S. Crustal structure modeling of earthquake data. 1. Simultaneous least square estimation of hypocenter and and velocity parameters // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. № 17. p. 3036-3046.
22. Gontovaya L., Stepanova M., Senyukov S., Nizkous I., Gordienko L. 3D velocity structure of Kluchevskoi volcano group (Kamchatka) // Geophysical Research abstracts, Volume 6, 2004, EGU General Assembly 2004, ISSN: 1029-7006, Nice, France 25-30 April 2004.
23. Kissling E., Ellsworth W. L., Ederhart-Pillips D., Kradolfer U. Initial reference models in local earthquake tomography. // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99, pp.19635-19646.
24. Miymachi H. and Moriya T. Velocity structure beneath the Hidaka mountains in Hokkaido, Japan. // J. Phys. Earth. 1984. V.32. № 1. p. 13-42.
25. Sato T. Velocity structure of the crust beneath the northeastern part of Honshu, Japan, as derived from local earthquake data. // J. Phys. Earth. 1979. V.27. № 3, p. 239-253.
26. Harris A.J.L., Butterworth A.L., Carlton R.W., Downey I., Miller P., Navarro P., Rothery D.A. (1997) Low-cost volcano surveillance from space: case studies from Etna, Krafla, Cerro Negro, Fogo, Lascaar and Erebus. Bull Volcanol 59:49-64.