

III. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

*С.Л. Сеньков, В.Н. Чебров, В.Т. Гарбузова, С.Я. Дроздина, И.Н. Нуждина,
Т.Ю. Кожевникова, С.Л. Толокнова*

По современным представлениям [1], на Камчатке обнаружено более 200 крупных вулканических сооружений (щитовых вулканов, стратовулканов, кальдер) и более 2000 мелких вулканических образований (шлаковых и лавовых конусов, экструзивных куполов, взрывных воронок и мааров). Из всего этого многообразия выделено 29 действующих вулканов (рис. 1). По определению, это те вулканы, извержения которых происходили в позднем голоцене и которые обнаруживают признаки активного состояния магматического очага в настоящее время (фумарольная деятельность, сейсмичность, деформации поверхности и т.п.) [1]. Сеть сейсмических станций в вулканических районах по состоянию на 1999 г. представлена на рис. 1, где также показаны изолинии расчетных значений K_{\min} .

Мониторинг действующих вулканов на Камчатке проводится с целью своевременного предупреждения населения и административных органов о возможности их извержения для уменьшения последствий катастрофических событий, для обеспечения безопасности авиалетов в районе Камчатки [2, 3].

Проблема прогноза извержений вулканов до настоящего времени в целом 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.

Оценка состояния вулканов делается по данным следующих наблюдений:

- за сейсмической активностью;
- визуальные и видеонаблюдения вулканов;
- спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов.

Наиболее информативными и надежными являются данные наблюдений за сейсмической активностью. Их качество не зависит от погодных условий, а высокая информативность доказана многочисленными исследованиями как на Камчатке, так и в мире.

Несмотря на некоторые достижения в области сейсмического мониторинга на действующих вулканах и в использовании сейсмологических данных для оценки их активности (состояния), существует ряд проблем, которые постепенно решаются:

- недостаточная изученность процессов подготовки извержений (только для некоторых вулканов существует продолжительный ряд наблюдений);
- приобретенный опыт позволяет сделать вывод о необходимости регистрации слабых сейсмических сигналов, что требует увеличения числа станций, расположенных вблизи вулканов;
- проблема локации землетрясений в постройке вулканов выше уровня моря;
- локальность и неоднородность скоростного строения района вулкана и его постройки, необходимость уточнения скоростных моделей;
- обеспечение сбора и обработки данных в реальном масштабе времени (в оперативном режиме), так как сейсмическая подготовка может длиться не более двух суток;

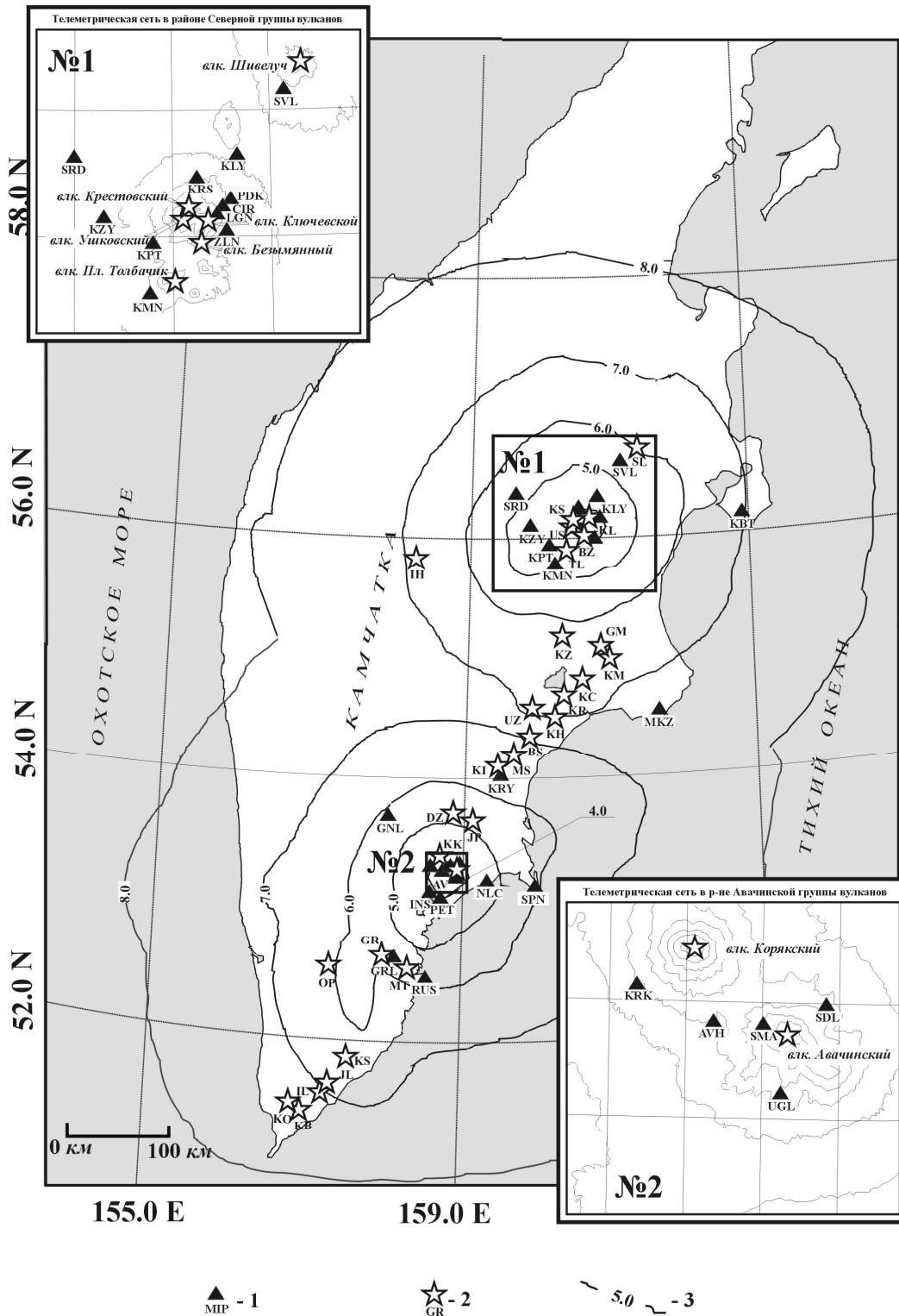


Рис. 1. Активные вулканы Камчатки, радиотелеметрические станции и изолинии K_{min} за 1999 г.

1 – телеметрическая сейсмическая станция; 2 – вулкан; 3 – изолиния K_{min} .

Названия вулканов и их коды: Шивелуч (SL), Ключевской (KL), Ушковский (US), Безымянный (BZ), Плоский Толбачик (TL), Новые Толбачинские вулканы (TE), Ичинский (IH), Кизимен (KZ), Гамчен (GM), Комарова (KM), Кроноцкий (KC), Крашенинникова (KR), Кихпинич (KH), Узон (UZ), Большой Семячик (BS), Малый Семячик (MS), Карымский (KI), Дзензур (DZ), Жупановский (JP), Корякский (KK), Авачинский (AV), Горелый (GR), Мутновский (MT), Опала (OP), Ксудач (KS), Желтовский (JL), Ильинский (IL), Кошелевский (KO), Камбальный (KB).

Код и название телеметрических станций: SVL – «Шивелуч», KLY – «Ключи», SRD – «Срединный», KRS – «Крестовский», PDK – «Подкова», CIR – «Цирю», LGN – «Логонов», KPT – «Копыто», KZY – «Козыревск», ZLN – «Зеленая», KMN – «Каменистая», KRK – «Коряка», AVH – «Авача», SDI – «Седловина», SMA – «Сомма», UGL – «Угловая».

На врезках показаны районы Северной (№ 1) и Авачинской (№ 2) групп вулканов.

- разработка и внедрение новых методик и алгоритмов оценки текущего состояния вулканов [4]. Главным здесь представляется определение индивидуального для каждого вулкана понятия фоновой сейсмичности, так как на базе этого понятия делается главный вывод о том, опасен или нет вулкан в настоящее время. Следующим важным этапом является сбор эталонов сейсмических сигналов, соответствующих различным вулканическим событиям (пепловые выбросы, пирокластические лавины и т.д.). Если только по сейсмическим сигналам можно будет делать выводы о том, что происходит на вулкане даже в отсутствие визуальных или видеоданных, то можно будет и обоснованно оценивать его состояние [5].

Инструментальные сейсмологические наблюдения за сейсмическим режимом активных вулканов на Камчатке начались в 1946 г., со времени открытия сейсмической (вулканической) станции «Ключи» в одноименном поселке [6]. Положение эпицентров землетрясений определялось по одной станции с использованием поляризации волн первых вступлений и по разности времен вступлений *S*- и *P*-волн. Материалы первых сейсмических наблюдений публиковались в «Бюллетене Камчатской вулканологической станции АН СССР». Первые исследования взаимосвязи активности вулканов с их сейсмическим режимом связаны с именем Г.С. Горшкова [7, 8].

В 1958 г. была оборудована сейсмическая станция «Козыревск», а в 1960 г. – «Апахончич». В 1958–1970 гг. для отдельных сильных роев вулканических землетрясений (например, извержение вулкана Шивелуч в 1964 г., побочные прорывы вулкана Ключевской) были составлены первые каталоги, которые опубликованы в книге П.И. Токарева «Вулканические землетрясения Камчатки» [9]. Для локации очагов вулканических землетрясений использовался предложенный Ю.В. Ризниченко [10] метод массового определения координат очагов с помощью палеток изохрон, построенных по среднекамчатскому скоростному разрезу [9]. Первые обобщающие публикации по исследованиям сейсмичности на вулканах были сделаны П.И. Токаревым [11, 12]. Книга П.И. Токарева [9] посвящена изучению землетрясений, связанных с деятельностью вулканов Шивелуч, Безымянный и Ключевской, выявлению закономерностей их связи с извержениями, разработке методики прогноза извержений по сейсмическим данным. В ней была также предложена классификация вулканических землетрясений по типам, дано их описание. Классификация вулканических землетрясений П.И. Токарева из [9], описанная ниже, используется и в современной обработке.

С 1971 по 1996 гг. по мере увеличения числа сейсмических станций кинематические и динамические параметры вулканических землетрясений стали определяться с помощью компьютерных программ [13]. Был продолжен детальный анализ сейсмичности Ключевской группы вулканов (В.И. Горельчик [14, 15] и О.С. Чубарова [16, 17]). Каталог Северной группы вулканов за 1971–1996 гг. пересматривается в настоящее время группой сейсмологов (В.И. Горельчик, О.С. Чубаровой, В.Т. Гарбузовой, М.Я. Малкиной) и включает более 10500 землетрясений. Работа почти закончена, но каталоги еще не публиковались.

Накопленный сейсмологами опыт позволяет сделать заключение, что извержению вулканов всегда предшествует сейсмическая подготовка. Энергия предшествующих вулканических землетрясений во многих случаях мала, и они могут быть зарегистрированы только при условии работы близко расположенной сейсмической станции. Интенсивность сейсмической подготовки пропорциональна силе готовящегося извержения: вулканические землетрясения 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 разное время: иногда месяцы, иногда 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, которую трудно зафиксировать. 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: П.И. Токарев [18] – извержение вулкана Пло-

ский Толбачик в 1975–1976 гг.; П.И. Токарев [19] – побочный (предсказанный) прорыв Ключевского вулкана в марте 1983 г.; В.В. Иванов [20] – извержение вулкана Шивелуч в 2001 г. и т.д. Но с другой стороны, сюрпризом для всех стало средней силы извержение вулкана Авачинский в 1991 г. Не всегда удавалось зафиксировать сейсмическую подготовку перед умеренными извержениями вулкана Безымянный, который после катастрофического извержения 1956 г. извергается один-два раза в год.

В 1996–1998 гг. система обработки землетрясений Камчатки в Камчатской опытно-методической сейсмологической партии (КОМСП) ГС РАН, в том числе и землетрясений на активных вулканах, получила значительное развитие. В первую очередь это было связано с внедрением на приемных центрах радиотелеметрических сейсмических станций (РТСС) цифровой регистрации сейсмических сигналов, а также с широким внедрением в систему сбора и обработки данных сетевых компьютерных технологий. Были разработаны и внедрены методики и программное обеспечение для обработки сейсмических сигналов с экрана компьютера. Приемные центры РТСС были объединены в единую корпоративную компьютерную сеть КОМСП. Все это обеспечило доступ к данным всех станций РТСС в режиме реального времени и позволило проводить обработку землетрясений в режиме, близком к реальному времени. Подробно система сбора и обработки сейсмологической информации в КОМСП ГС РАН описана в [21]. С введением цифровой регистрации появилась возможность обрабатывать более слабые землетрясения в вулканических районах.

В 1996–1999 гг. радиотелеметрическая сеть сейсмических станций КОМСП позволяла проводить сейсмический мониторинг вулканов Камчатки в реальном режиме времени с разной степенью детальности. Сеть станций РТСС была способна регистрировать землетрясения в районе Авачинской и Ключевской групп вулканов с $K_S=4.0-5.0$ (энергетические классы K_S по [22]), где проводились наиболее детальные наблюдения. На вулканах Шивелуч, Карымский, Горелый работало только по одной станции, что позволяло фиксировать слабые локальные землетрясения, но не позволяло определять их пространственное положение. Для остальных вулканов была возможна регистрация сейсмических событий только по удаленным станциям с $K_S=8-9$, что, конечно, недостаточно для контроля состояния вулканов.

В настоящее время все определения основных параметров землетрясений выполняются с помощью программы Ю.Ю. Мельникова [23]. Локация гипоцентров вулканических землетрясений имеет свои особенности. Обычно область поиска гипоцентров – это пространство ниже уровня моря. Но положение гипоцентров вулканических землетрясений может быть в постройке вулкана, т.е. выше уровня моря и иногда выше регистрирующих станций. Практически только установка сейсмической станции («Сомма» – для Авачинского вулкана, «Логинов» – для Ключевского вулкана) в верхней части постройки вулкана решает вопрос о неоднозначности определения координат гипоцентра. Важным вкладом в решение проблемы локации гипоцентров вулканических землетрясений было корректное введение в программу построек вулканов, как областей поиска возможных решений. Также были проведены многочисленные эксперименты по поиску адекватных одномерных скоростных моделей районов Авачинской и Северной групп вулканов. Все это в итоге позволило получать корректные непротиворечивые данные по положению гипоцентров землетрясений в районах Авачинской и Ключевской групп вулканов. Характеристика сети сейсмических станций дана в [24].

Благодаря внедрению современных технологий сбора и обработки сейсмологической информации и большой работе по организации оперативного режима контроля сейсмичности вулканов в 1999 г. все землетрясения Северной группы вулканов были впервые обработаны в полном объеме (без пропусков) в режиме, близком к реальному времени (рис. 2).

Сотрудники КОМСП стали принимать участие в составлении оперативного каталога землетрясений Северной группы в 1994 г. За период с 1994 по 1999 гг. в режиме оперативной обработки определялись параметры только выборочных землетрясений (около 10–30%) с использованием программы [23]. Остальные землетрясения обрабатывались в отложенном режиме в сотрудничестве с Институтом вулканической геологии и геохимии при помощи программы П.И. Сургучева [13].

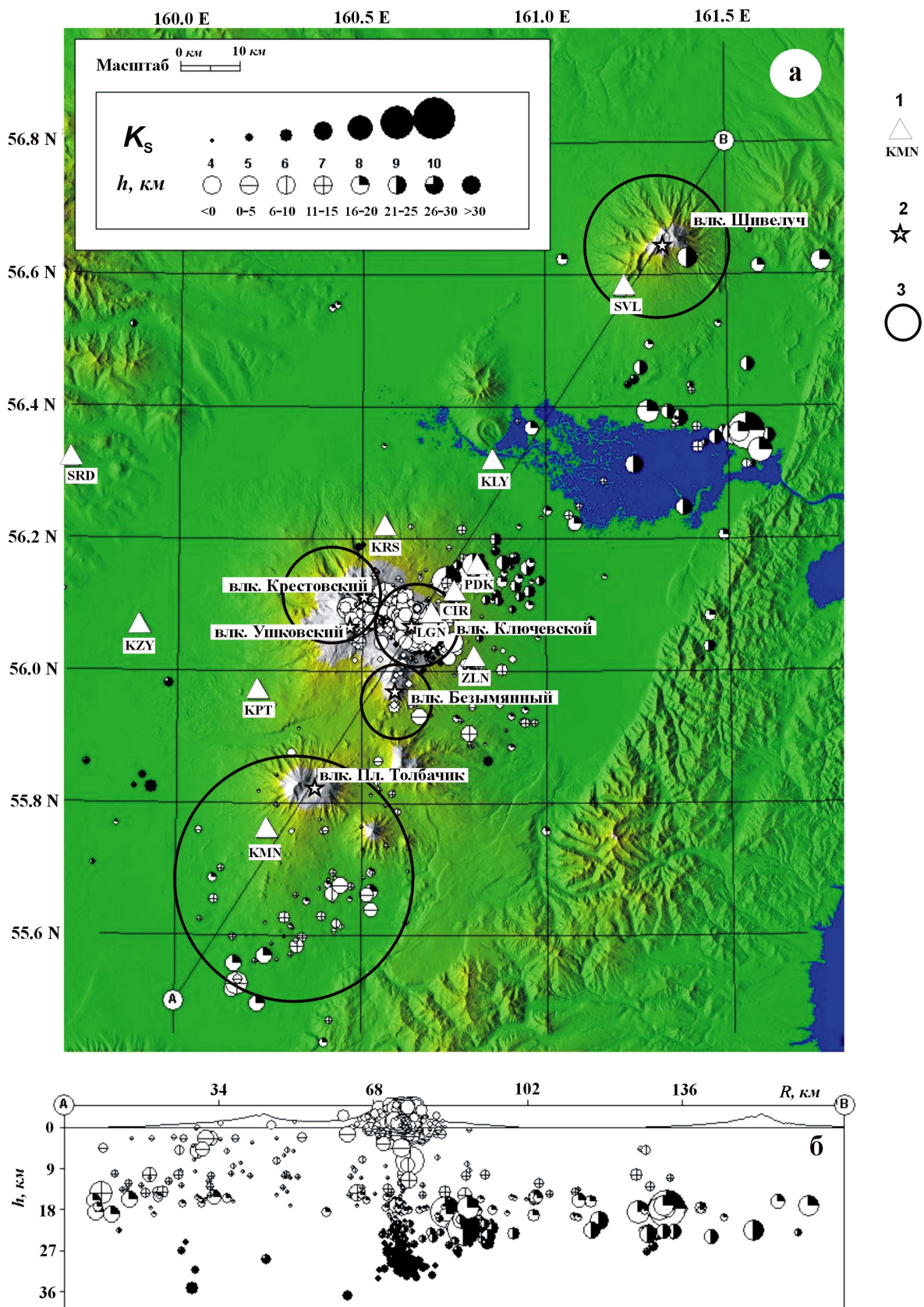


Рис. 2. Карта эпицентров (а) и вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 1
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность вокруг вулкана обозначает область выборки землетрясений, для которой построены графики сейсмической активности. Радиусы областей, соответственно, равны: Шивелуч – 12 км), Ключевской – 7 км, Крестовский и Ушковский – 10 км, Безымянный – 6 км, Плоский Толбачик – 20 км.

Существенным недостатком в определении параметров гипоцентров по [23] было то, что при очевидной по визуальным данным активности в кратере Ключевского вулкана гипоцентры землетрясений получались не выше уровня моря, т.е. гипоцентров в постройке не было, что вызвало обоснованное недоверие.

В течение 1997–1998 гг. были проведены исследования одномерных скоростных разрезов (рис. 3). В результате перебора большого числа моделей на основе минимизации невязок вступлений от набора землетрясений с уверенными временами вступлений *P*- и *S*-волн и после экспериментального опробования была выбрана модель (б) на рис. 3, как наиболее удачная. Но тестирование полученных результатов программой INV1 Хироки Миямачи (Университет Кагошима, Япония) [25–27] показало их некорректность. 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 (погрешность не более 100 м) в 1999–2000 гг. (табл. 1). Ошибки предыдущих определений были равны 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 гг. новых радиотелеметрических станций «Копыто», «Цирк» и «Логонов» (рис. 1) значительно улучшило обработку землетрясений в районе Северной группы вулканов.

Таблица 1. Координаты телеметрических сейсмических станций до и после переопределения с помощью GPS

| Станция | | φ°, N | λ°, E | $h_y,$ м | Разница (в плане), м |
|-------------|--------|--------------------|--------------------|-------------|-------------------------|
| Срединный | старые | 56.317 | 159.717 | 800 | 1242 |
| | новые | 56.316 | 159.697 | 750 | |
| Крестовский | старые | 56.214 | 160.558 | 1200 | 548 |
| | новые | 56.217 | 160.565 | 1120 | |
| Шивелуч | старые | 56.583 | 161.225 | 900 | 735 |
| | новые | 56.577 | 161.22 | 840 | |
| Козырь | старые | 56.070 | 159.900 | 45 | 510 |
| | новые | 56.066 | 159.896 | 45 | |
| Подкова | старые | 56.14 | 160.78 | 800 | 878 |
| | новые | 56.139 | 160.794 | 985 | |
| Ключи | старые | 56.313 | 160.852 | 0 | 600 |
| | новые | 56.317 | 160.858 | 47 | |
| Каменистая | старые | 55.76 | 160.24 | 1100 | 624 |
| | новые | 55.756 | 160.247 | 1150 | |
| Зеленая | старые | 56.018 | 160.804 | 1100 | 112 |
| | новые | 56.017 | 160.804 | 1120 | |

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 – вариант (в), который в целом не противоречит данным сейсмического просвечивания Ключевской группы вулканов 1986–1987 гг. и существенно отличается от разреза по модели (а) [13], используемого до 1996 г. Введение нового разреза (в) в программу [23] и расчеты для 2042 вступлений *P*-волн от 308 землетрясений, произошедших в феврале 2000 г., уменьшило среднеквадратическую невязку с 0.420 с до 0.365 с, т.е. на 15%. Но так как около 90% этих землетрясений происходили в районе Ключевского вулкана, то и полученная модель (в) относится в большой мере к району Ключевского вулкана. Таким образом, модель (б), координаты сейсмических станций из табл. 1 и получаемые с помощью программы [23] 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 Толбачинского дола или вулкана Шивелуч, более правильно определить свою скоростную модель по данным местных землетрясений.

Правомерность и объективность принятого подхода была дополнительно показана позже тестированием данных Северной группы вулканов с использованием [28]. В 2004 г. была определена одномерная скоростная модель района Ключевского вулкана по данным оперативной обработки 2003 г. [29] по программе [28]. Основные результаты состоят в следующем:

- данные по Северной группе вулканов корректные и высокого качества [устное сообщение Е. Кисслинга];
- одномерная скоростная модель (г), полученная при устойчивой сходимости решений гипоцентров вулканических землетрясений, имеет незначительные отличия от моделей (б) и (в), но имеет существенные отличия от модели (а) в верхней части разреза;
- для постройки любого вулкана (из этой группы) выше уровня моря определена скорость P -волны $v_p=3$ км/с, что было ранее получено для вулканов Авачинский [16, 17] и Карымский [30].

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 для различных вулканов. По этим данным составляется окончательный каталог, где присутствует дополнительно большое число землетрясений с классом несколько ниже K_{min} . Землетрясения за 1999 г. были пересчитаны в соответствии с настоящей методикой. Их каталог приведен в наст. сб. [31]. Землетрясения за 1997 и 1998 гг. находятся еще в стадии переобработки.

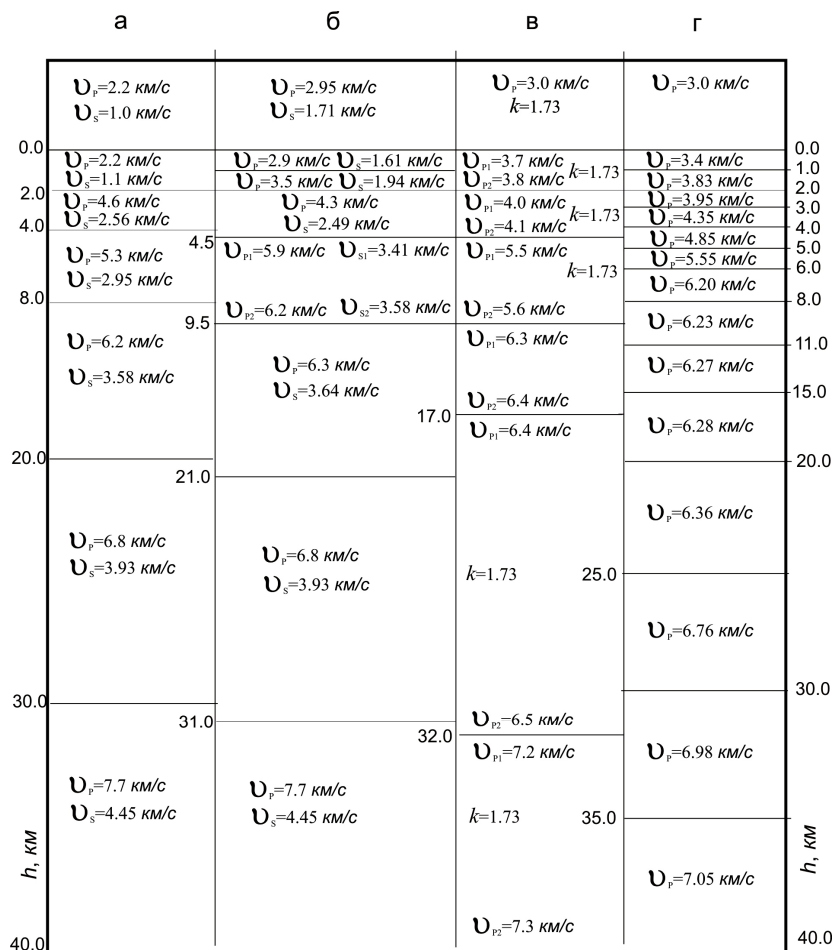


Рис. 3. Скоростные модели для расчета гипоцентров землетрясений в Северной группе вулканов: а – модель, используемая до 1996 г.; б – новая базовая модель, используемая с 1999 г.; в – модель, рассчитанная по программе INV1; г – модель, рассчитанная по программе E. Kissling and oth. [28].

v_p , v_s – скорость P - и S -волн соответственно; k – отношение скоростей v_p/v_s . Если в слое указаны две граничные скорости (v_{p1} и v_{p2}), то скорость в толще слоя изменяется по линейной зависимости.

К сожалению, каталог, содержащий стандартные характеристики вулканических землетрясений (время в очаге, координаты гипоцентра и энергетический класс K_S) позволяет проводить пространственно-временной анализ сейсмичности, но не отражает всего многообразия сейсмических явлений. Поэтому в оперативном режиме выполняется также традиционная, исторически сложившаяся обработка вулканических землетрясений по одной станции с разделением по типам из [9] и определением их числа и суммарного отношения A/T . В [9] выделены пять типов (I–V) вулканических землетрясений:

Тип I по характеру записи ничем не отличаются от местных тектонических землетрясений. На записи преобладают объемные волны, а поверхностные волны или отсутствуют, или выражены очень слабо. Их очаги лежат в земной коре на глубине 5–30 км.

Тип II по характеру записи резко отличается от землетрясений типа I: объемные P - и S -волны имеют четкие вступления и большие периоды колебаний. Регистрируются также интенсивные поверхностные волны с амплитудами в 1–3 раза больше амплитуд S -волн. Очаги землетрясений лежат на глубине до 5 км вблизи выводного канала в слое консолидированных осадков и в теле вулканической постройки выше уровня моря.

Тип III по характеру записи больше похож на вулканические землетрясения II типа, но отличаются от них большими периодами продольных волн и более интенсивными поверхностными волнами, амплитуда которых превосходит в 5–10 раз амплитуду S -волн. Очаги землетрясений лежат в самых верхних слоях рыхлых осадков, слагающих тело вулкана, на удалении не более 1 км от активного кратера и всегда выше уровня моря.

Тип IV – взрывные вулканические землетрясения, вызванные взрывами в кратере вулкана и по характеру записи очень похожи на землетрясения III-го типа, имеют такие же большие периоды P -волн и интенсивные поверхностные волны, но S -волну уверенно выделить невозможно.

Тип V – непрерывное вулканическое дрожание, близкое к гармоническим колебаниям длительностью от нескольких минут до нескольких лет.

Вулканические землетрясения I–III типов обрабатываются, как правило, по стандартной методике для обычных землетрясений: определяются времена вступлений P - и S -волн, максимальные амплитуды (A_{max}) и периоды S -волн, энергетические классы и координаты гипоцентров. В случае регистрации тремя и более станциями определяется гипоцентр с включением в каталог. Для более слабых землетрясений I–III типов, а также IV-го измеряется отношение A_{max}/T , что характеризует их энергию (для велосиграфов измеряется только A_{max}). Для вулканического дрожания (тип V) измеряются $(A/T)_{max}$ и суммарная продолжительность τ цугов колебаний. Результаты прямых измерений $(A/T)_{max}$ и расчетов $(A/T)_{cp}$, $\Sigma A/T$ заносятся в таблицы. Перечисленные параметры служат главным образом для целей краткосрочного сейсмического прогноза по [9]. Ниже приведены результаты мониторинга за 1999 г. для шести вулканов Ключевской группы и за 1996–1999 гг. – для двух вулканов Авачинской группы.

Сейсмичность Ключевской группы вулканов в 1999 г. Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки. Координаты центра активного кратера – 56°38' N, 61°19' E, абсолютная высота нового купола – около 2500 м. Вулкан находится в 45 км к северо-востоку от г. Ключи. Ближайшая телеметрическая станция «Шивелуч» расположена в 8.5 км от его кратера. Минимальный энергетический класс вулканических землетрясений по записям одной станции равен $K_S=3.1$, а уровень представительного класса по трем станциям соответствует $K_{min}=5.5$. На этом вулкане в 1999 г. было зафиксировано по визуальным данным пять газопепловых выбросов (табл. 2) высотой до 6–8 км над уровнем моря.

Таблица 2. Время возникновения и высота h_y газопепловых выбросов вулкана Шивелуч по визуальным наблюдениям в 1999 г.

| Дата, д м | t_0 , ч мин | h_y , км |
|--------------|------------------|---------------|
| 02.04 | 21 56 | 4.5 |
| 12.04 | 06 55 | 3.5 |
| 26.10 | 19 59 | 6–8 |
| 31.10 | 22 10 | 6 |
| 23.11 | 20 44 | 5.5 |

Определить координаты эпицентра оказалось возможным только для одного землетрясения (рис. 1), которое и вошло в каталог, а другие локализовать не удалось. По этой причине проведена традиционная обработка вулканических землетрясений по записям на одной станции «Шивелуч» в радиусе 12 км (рис. 2). В табл. 3 представлены данные о землетрясениях, зарегистрированных в 1999 г.

Обозначения в табл. 3, 4, 6–8: $N(A/T < 0.2)$ – число землетрясений с отношением амплитуды к периоду $< 0.2 \mu$; $N(A/T \geq 0.2)$ – число землетрясений с отношением амплитуды к периоду $\geq 0.2 \mu$; τ , час – продолжительность в часах.

Вулкан Ключевской: координаты вершины – $56^{\circ}04' N$, $160^{\circ}38' E$, абсолютная высота вулкана – 4750 м. Диаметр вершинного кратера, венчающего конус, – около 700 м. Ближайшая телеметрическая станция «Логоинов» расположена в 4 км от кратера. Минимальный энергетический класс вулканических землетрясений по записям этой станции равен $K_S=2.2$, а уровень представительного класса по трем станциям соответствует $K_{min}=4.5$. В 1999 г. были определены параметры почти для 1330 землетрясений с $K_S > 4.0$. Карта их эпицентров и вертикальный разрез представлены на рис. 2, а характеристики сейсмичности (K_S , ΣN , ΣE , глубины очагов h) в течение 1999 г. – на рис. 4. Также был выполнен традиционный подсчет результатов измерений параметров землетрясений с разбиением по типам (табл. 4).

Таблица 3. Параметры (N , K_{Smax} , $\Sigma A/T$ и др.) вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи вулкана Шивелуч за 1999 г. на одноименной сейсмической станции

| Месяц | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------------------------|-------------|------------|--------------|-------------|-------------|------------|--------------|-------------|----------------|--------------|-------------------|------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| | I | | | II, III | | | IV | | | V | | | | | | |
| | | | | | | | | | | Низкочастотные | | | Вулканическое дрожание | | | |
| | N <0.2 | N ≥0.2 | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N <0.2 | N ≥0.2 | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N <0.2 | N ≥0.2 | $\Sigma A/T$ | $\Sigma A/T_{cp}$ | $\Sigma A/T_{max}$ | $\Sigma \tau$, ч | $\Sigma A/T_{cp}$ | $\Sigma A/T_{max}$ |
| Январь | 2 | 11 | 6 | 7.01 | 2 | 5.2 | 0.81 | 3 | 3 | 2.2 | | | | 0.26 | 1.43 | 29 |
| Февраль | | 12 | 8.4 | 32.16 | 7 | 6.5 | 6.63 | 22 | 20 | 14.77 | 0.24 | 1.89 | 0.42 | 0.37 | 1.75 | 60.33 |
| Март | 5 | 25 | 5.6 | 11.58 | 6 | 6.1 | 5.13 | 26 | 25 | 23.03 | 0.28 | 1.51 | 0.31 | 0.29 | 2.39 | 10.26 |
| Апрель | 9 | 6 | 6.1 | 5.8 | 6 | 5.4 | 4.31 | 83 | 65 | 44.89 | 0.34 | 0.62 | 0.15 | | | |
| Май | | 10 | 6.5 | 12.97 | 21 | 5.6 | 12.38 | 375 | 180 | 151.09 | | | | 0.19 | 0.57 | 2.54 |
| Июнь | | 12 | 7.5 | 16.79 | | | | 160 | 163 | 172.66 | 1.47 | 2.14 | 0.22 | 0.22 | 1.85 | 18.3 |
| Июль | | 6 | 6.1 | 4.2 | 17 | 4.9 | 13.13 | 98 | 49 | 48.77 | 0.32 | 1.73 | 0.2 | 0.12 | 0.35 | 0.25 |
| Август | | 7 | 7.9 | 10.14 | 3 | 6.4 | 3.28 | 83 | 23 | 24.59 | 0.33 | 2.03 | 1.91 | | | |
| Сентябрь | | 1 | 4.9 | 0.39 | 5 | 4.5 | 3.02 | 59 | 31 | 26.91 | 0.43 | 6.25 | 7.46 | 0.12 | 0.2 | 23.5 |
| Октябрь | | 2 | 4.5 | 0.62 | 4 | 5.6 | 6.07 | 17 | 41 | 36.17 | 0.59 | 6.71 | 1.18 | 0.1 | 0.2 | 0.25 |
| Ноябрь | | 2 | 6.8 | 4.12 | | | | 52 | 18 | 19.26 | 0.32 | 6.36 | 1.5 | 0.1 | 0.2 | 1.44 |
| Декабрь | | 4 | 6.6 | 2.61 | | | | 18 | 11 | 8.44 | 0.61 | 4.43 | 6.07 | | | |
| Всего за год | 16 | 98 | | 108.39 | 71 | | 54.76 | 996 | 629 | 572.78 | | | 19.42 | | | 145.87 |

Таблица 4. Параметры (N , K_{Smax} , $\Sigma A/T$ и др.) вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи вулкана Ключевской за 01.01–16.08.1999 г. по записям сейсмической станции «Подкова» и за 17.08–31.12 1999 г. – по записям станции «Цирк»

| Месяц | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|----------------------------------|-------------|------------|--------------|-------------|-------------|------------|--------------|-------------|------------------------|--------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| | I | | | II, III | | | IV | | | V | | | | | | |
| | | | | | | | | | | Вулканическое дрожание | | | | | | |
| | N <0.2 | N ≥0.2 | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N <0.2 | N ≥0.2 | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N <0.2 | N ≥0.2 | $\Sigma A/T$ | $\Sigma A/T_{cp}$ | $\Sigma A/T_{max}$ | $\Sigma \tau$, ч | $\Sigma A/T_{cp}$ | $\Sigma A/T_{max}$ |
| Январь | 27 | 82 | 6.7 | 48.9 | | | 59 | 8.5 | 187.67 | 458 | 142 | 302.98 | 0.11 | 0.23 | | 96 |
| Февраль | 91 | 374 | 7.9 | 163.74 | | | 25 | 8.6 | 68.77 | 195 | 87 | 483.09 | 0.13 | 0.38 | | 288 |
| Март | 144 | 140 | 7.9 | 50.56 | | | 60 | 7.9 | 61.88 | 544 | 94 | 200.69 | 0.09 | 0.41 | | 648 |
| Апрель | 1 | 37 | 7.8 | 38.07 | | | 121 | 6.8 | 61.41 | 610 | 105 | 114.59 | 0.12 | 0.23 | | 528 |
| Май | 107 | 50 | 7.9 | 45.53 | 3 | 239 | 8.6 | 199.66 | 2028 | 387 | 1349.27 | 0.09 | 0.27 | | 744 | |
| Июнь | 159 | 42 | 7.9 | 44.5 | | | 29 | 8.1 | 44.97 | 1336 | 116 | 126.56 | 0.15 | 0.3 | | 408 |

| Месяц | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------------------------|------|-------------------|---------|------|------|-------------------|---------|-------|------|---------|------------------------|---------------------|-------|
| | I | | | II, III | | | | IV | | | V | | | |
| | N | | K _{Smax} | ΣA/T | N | | K _{Smax} | ΣA/T | N | | ΣA/T | Вулканическое дрожание | | |
| | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.2 | ≥0.2 | | ΣA/T _{cp} | ΣA/T _{max} | Στ, ч |
| Июль | | 7 | 9.7 | 120.82 | | 56 | 8.1 | 43.62 | 1024 | 195 | 179.69 | 0.13 | 0.93 | 576 |
| Август | | 6 | 6.8 | 6.36 | 2 | 34 | 7.6 | 22.03 | 656 | 57 | 54.46 | 0.07 | 0.26 | 600 |
| Сентябрь | 1 | 7 | 6.1 | 3.6 | | 34 | 7.9 | 42.32 | 565 | 38 | 26.44 | | | |
| Октябрь | | 8 | 9.2 | 86.96 | | 60 | 8.4 | 102.91 | 1329 | 45 | 40.18 | 0.12 | 0.47 | 336 |
| Ноябрь | | 16 | 9.7 | 103.68 | | 261 | 8.5 | 331.18 | 3069 | 326 | 610.09 | 0.11 | 0.48 | 384 |
| Декабрь | | 5 | 6.4 | 5.47 | 103 | 96 | 7.6 | 190.62 | 6075 | 371 | 393.99 | 0.13 | 0.6 | 288 |
| Всего за год | 530 | 774 | | 718.19 | 108 | 1074 | | 1357.04 | 17889 | 1963 | 3882.03 | | | 4896 |

Извержения на этом вулкане в 1999 г. были только эксплозивными из центрального кратера в виде газо-пепловых выбросов (табл. 5). Отметим, что положение гипоцентров землетрясений, предварявших и сопровождавших эксплозивные выбросы, совпало с центральной частью постройки вулкана выше уровня моря.

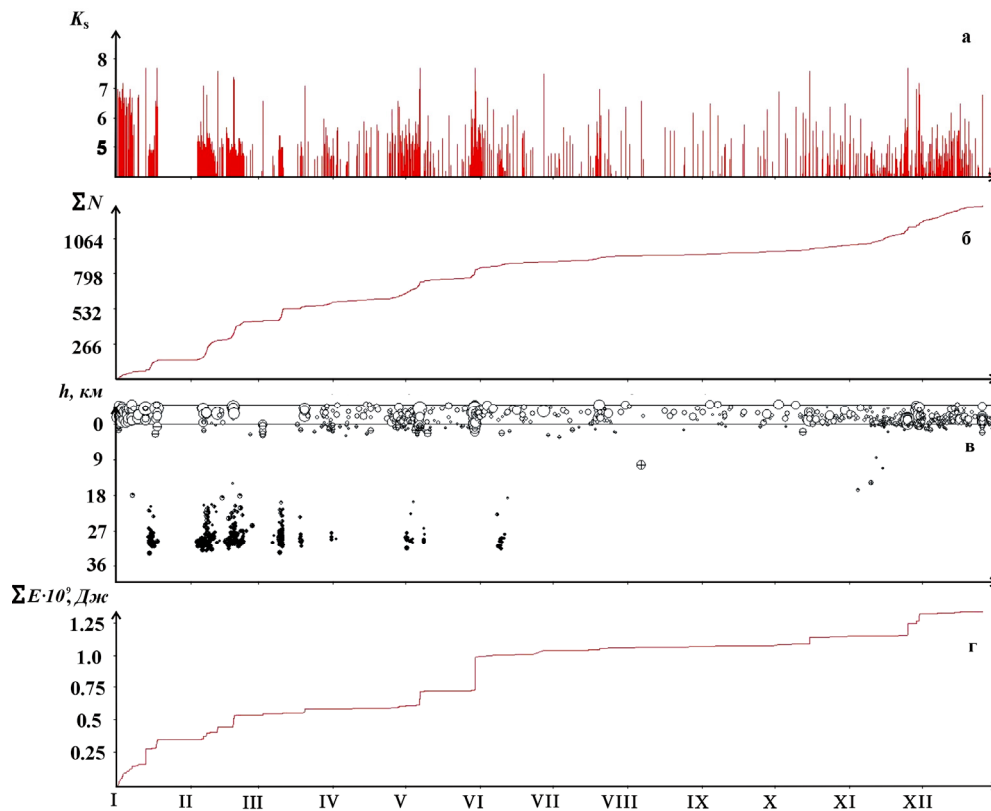


Рис. 4. Графики распределения во времени характеристик (энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б); глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г)) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в 1999 г. в радиусе 7 км от Ключевского вулкана

Таблица 5. Пепловые выбросы вулкана Ключевской в 1999 г. по визуальным данным на сейсмической станции «Ключи»

| Дата, д м | t_0 , ч мин | Высота пепловых выбросов над кратером, км |
|--------------|------------------|--|
| 06.02 | 05 28 – 05 54 | 2.5 |
| 27.04–05.05 | | 0.4–2.5 |
| 06.05 | 22 02 – 22 17 | 3 |
| 07–10.05 | | 2–3 |

Вулкан Безымянный: координаты вершины – 55°58' N, 160°35' E, абсолютная высота вулкана – 2869 м. Ближайшие телеметрические станции «Логоинов» и «Зеленая» расположены в 13.5 км от кратера вулкана (рис. 2, а). Минимальный энергетический класс вулканических землетрясений по записям этих станций равен $K_S=3.6$, а уровень представительного класса по трем станциям соответствует $K_{\min}=4.5$. Традиционная обработка землетрясений с разделением по типам и определением их числа и суммарного отношения A/T представлена в табл. 6.

Таблица 6. Параметры (N , $K_{S\max}$, $\Sigma A/T$ и др.) вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи вулкана Безымянный по записям сейсмической станции «Зеленая» за 1999 г.

| Месяц | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------------------------|-------------|--------------|-------------------|-------------|--------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|-------|
| | I | | | II, III | | | IV | | V | | | | | |
| | N ≥ 0.2 | $K_{S\max}$ | $\Sigma A/T$ | N ≥ 0.2 | $K_{S\max}$ | $\Sigma A/T$ | N ≥ 0.2 | $\Sigma A/T$ | Низкочастотные | | | Вулканическое дрожание | | |
| | | | | | | | | $\Sigma A/T_{\text{cp}}$ | $\Sigma A/T_{\text{max}}$ | $\Sigma \tau$, ч | $\Sigma A/T_{\text{cp}}$ | $\Sigma A/T_{\text{max}}$ | $\Sigma \tau$, ч | |
| Январь | 1 | | | 3 | 5.8 | 2.19 | 1 | 0.87 | | | | | | |
| Февраль | | | | 4 | 5.1 | 1.2 | 513 | 129.6 | 0.66 | 1.94 | 11.65 | 0.37 | 0.77 | 237.8 |
| Март | | | | | | | | | | | | 0.19 | 0.43 | 96 |
| Апрель | | | | | | | 1 | 0.71 | | | | | | |
| Май | | | | | | | | | | | | | | |
| Июнь | | | | | | | | | | | | | | |
| Июль | | | | | | | | | | | | | | |
| Август | 1 | 5.1 | 0.45 | | | | 1 | 1.64 | | | | | | |
| Сентябрь | | | | | | | | | | | | | | |
| Октябрь | | | | 1 | 7.1 | 3.66 | | | | | | | | |
| Ноябрь | | | | | | | | | | | | | | |
| Декабрь | | | | | | | | | | | | | | |
| Всего за год | 2 | | 0.91 | 8 | | 7.05 | 516 | 132.82 | | | | | | |

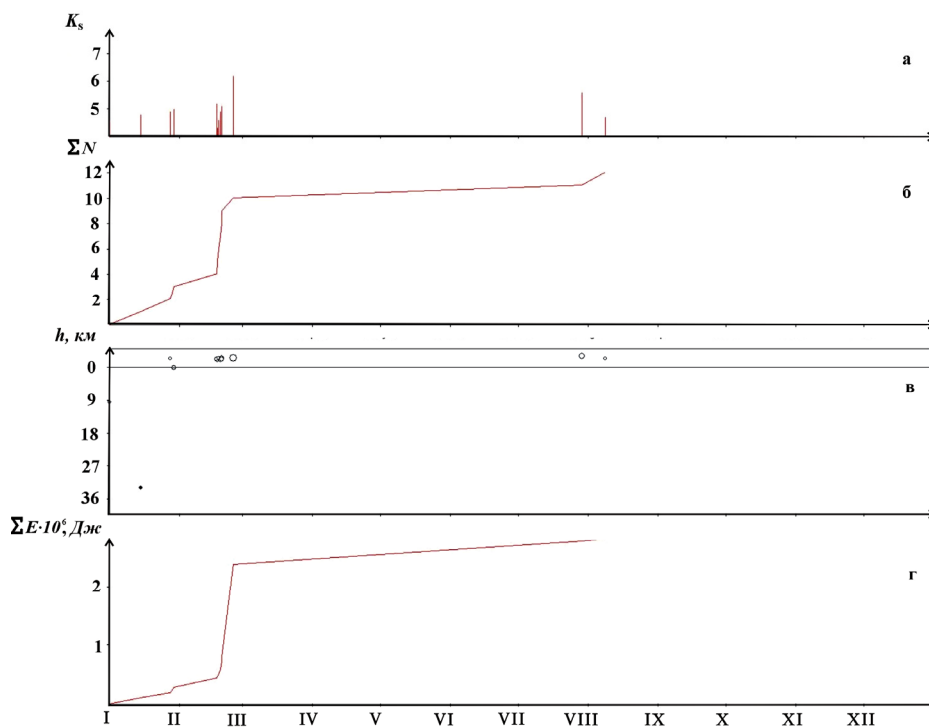


Рис. 5. Графики распределения во времени характеристик (энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б); глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г)) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в 1999 г. в радиусе 6 км от вулкана Безымянный

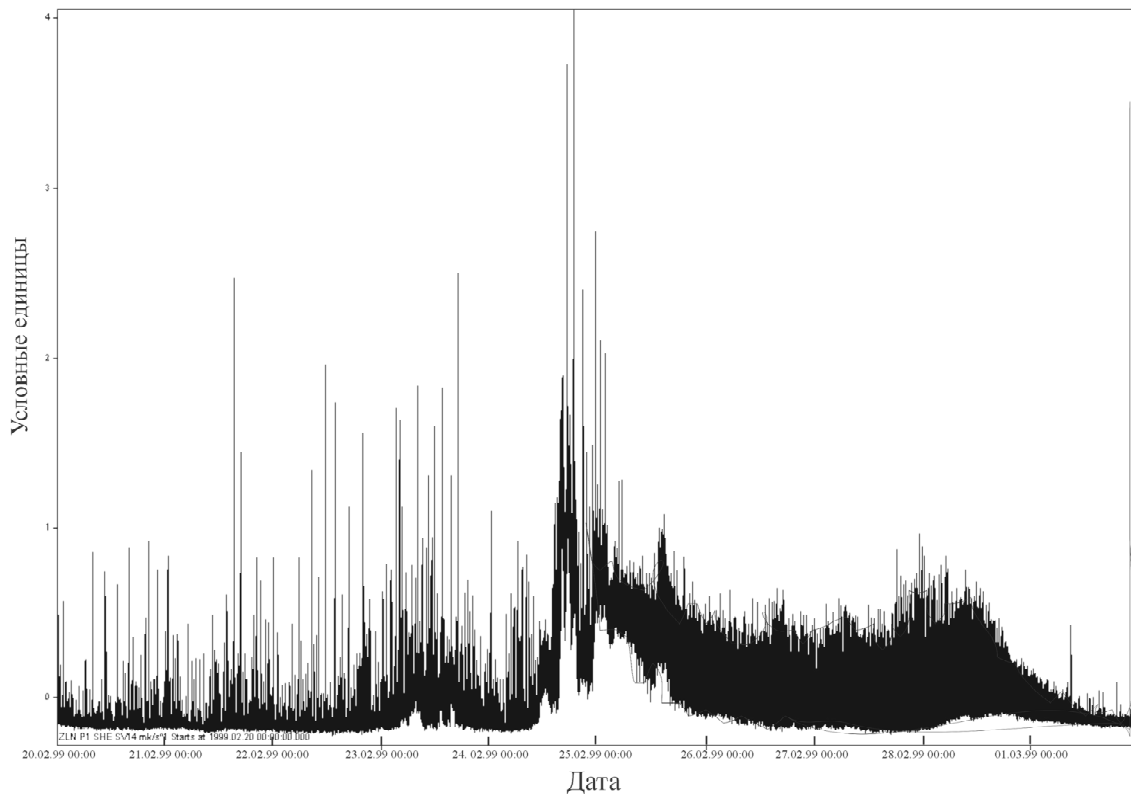


Рис. 6. Амплитуды сейсмических сигналов (в условных единицах) на сейсмической станции «Зеленая» с 20 февраля по 1 марта 1999 г. Из общего списка удалены локализованные землетрясения, которые вошли в каталоги региональных и вулканических землетрясений.

24 февраля 1999 г. на вулкане произошло эксплозивное извержение с выбросом пеплового облака до высоты 8 км над уровнем моря, которое в итоге достигло Алеутских островов. На рис. 5 представлены характеристики сейсмичности (K_S , ΣN , ΣE , глубины очагов h) в течение 1999 г. района вулкана Безымянный (выделен окружностью на рис. 2, а). График $K_S=f(t)$ наглядно показывает, что в период между извержениями в районе вулкана землетрясения практически не регистрируются. Предваряющая извержение сейсмичность состояла из роя немногочисленных слабых землетрясений, число которых увеличилось перед извержением. По данным регистрации вулканического дрожания (рис. 6), извержение началось 24 февраля в 14^h30^m и продолжалось до 1 марта.

Вулкан Плоский Толбачик: координаты вершины – 55°49' N, 160°22' E, абсолютная высота вулкана – 3085 м. Ближайшая телеметрическая станция «Каменистая» расположена в 10 км от кратера вулкана. Минимальный энергетический класс вулканических землетрясений по записям этой станции равен $K_S=3.3$, а уровень представительного класса по трем станциям соответствует $K_{\min}=5.0$. Обработка землетрясений с разделением по типам и определением их числа и суммарного отношения A/T дана в табл. 7. На рис. 2 представлены карта и разрез, на рис. 7 – характеристики сейсмичности (K_S , ΣN , ΣE , глубины очагов h) вулкана в течение 1999 г.

Вулканы Ушковский и Крестовский образуют единый вулканический массив, осложненный вершинной кальдерой и рассеченный глубокими ледниковыми ущельями и эрозионными долинами. Координаты их вершин соответственно равны: 56°07' N, 160°30' E и 56°04' N, 160°28' E; а абсолютные высоты – 4108 м и 3943 м. Ближайшие телеметрические станции «Крестовский» и «Логонов» расположены в 12 км от кратера Крестовского. Минимальный энергетический класс вулканических землетрясений по записям этих станций равен $K_S=3.5$, а уровень представительной регистрации соответствует $K_{\min}=5.0$. Карта эпицентров и разрез представлены на рис. 2, а характеристики сейсмичности (K_S , ΣN , ΣE , глубины очагов h) в течение 1999 г. представлены на рис. 8. Также был выполнен традиционный подсчет характеристик землетрясений с разбиением по типам (табл. 8).

Таблица 7. Параметры (N , K_{Smax} , $\Sigma A/T$ и др.) вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи вулкана Плоский Толбачик по записям сейсмической станции «Зеленая» за 1999 г.

| Месяц | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------------------------|------|------------|--------------|------|------|------------|--------------|------|------|--------------|------------------------|--------------------|-------------------------|
| | I | | | II, III | | | IV | | | V | | | | |
| | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | $\Sigma A/T$ | Вулканическое дрожание | | |
| | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.2 | ≥0.2 | | $\Sigma A/T_{cp.}$ | $\Sigma A/T_{max}$ | $\Sigma \tau, \text{ч}$ |
| Январь | | 6 | 7.9 | 8.92 | | 7 | 6 | 2.77 | | 112 | 37.71 | 0.65 | 1.15 | 0.66 |
| Февраль | | 11 | 7.6 | 14.88 | 3 | 67 | 6.8 | 30.95 | 2 | 4 | 1.12 | | | |
| Март | | 5 | 5.9 | 2.24 | 1 | 5 | | 2.11 | | 23 | 9.38 | | | |
| Апрель | 8 | 8 | 5.5 | 1.66 | | 4 | 5.7 | 1.55 | 16 | 3 | 0.97 | | | |
| Май | 5 | 6 | 7.5 | 4.82 | 3 | 5 | 6.2 | 1.6 | 19 | 1 | 0.24 | 0.2 | 0.35 | 0.3 |
| Июнь | 6 | 6 | 5.8 | 2.58 | 3 | 2 | 3.5 | 0.3 | | | | | | |
| Июль | 20 | 7 | 7.3 | 5.42 | 3 | 4 | 4.9 | 0.8 | 4 | | | | | |
| Август | 3 | 7 | 5.3 | 1.63 | 11 | 6 | 7.4 | 10.38 | | | | | | |
| Сентябрь | 2 | 5 | 7.5 | 5.32 | 18 | 2 | 4.5 | 0.31 | | | | | | |
| Октябрь | 2 | 1 | 6.3 | 1.16 | 4 | | | | 4 | 1 | 0.4 | 0.34 | 0.7 | 0.28 |
| Ноябрь | 12 | 13 | 6.2 | 5.96 | 3 | 2 | 4.5 | 0.46 | 5 | | | | | |
| Декабрь | 6 | 8 | 5.7 | 3.1 | 92 | 1 | 6.1 | 0.93 | | | | | | |
| Всего за год | 64 | 83 | | 57.69 | 141 | 105 | | 52.16 | 50 | 144 | 49.82 | 1.19 | 2.2 | 1.24 |

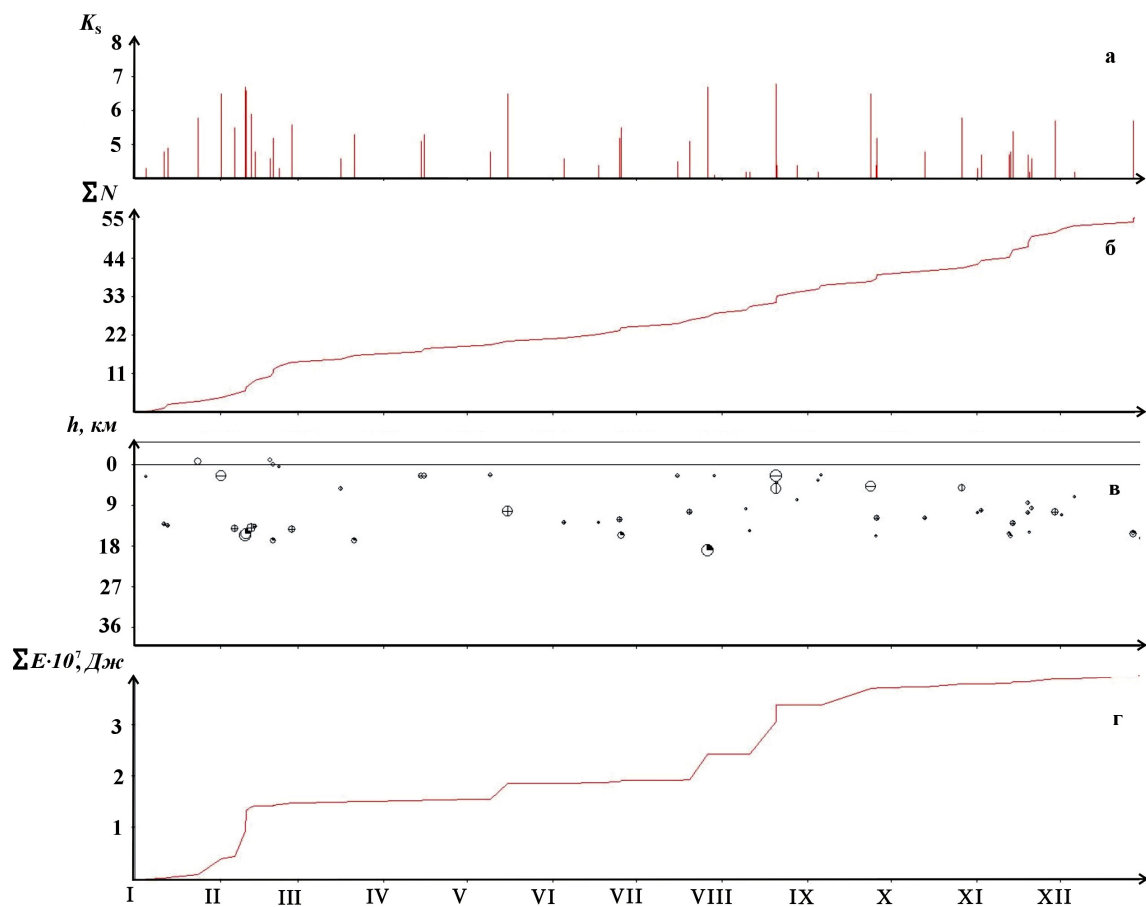


Рис. 7. Графики распределения во времени характеристик (энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б); глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г)) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в 1999 г. в радиусе 20 км от вулкана Плоский Толбачик

Таблица 8. Параметры (N , K_{Smax} , $\Sigma A/T$ и др.) вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи вулканов Крестовский и Ушковский по записям сейсмических станций «Крестовский» и «Логинов» за 1999 г.

| Месяц | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------------------------|------|------------|--------------|---------|------|------------|--------------|------|------|--------------|
| | I | | | | II, III | | | | IV | | |
| | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | $\Sigma A/T$ |
| | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.2 | ≥0.2 | |
| Январь | | | | | 2 | 8 | 11.91 | | | | |
| Февраль | | | | | 13 | 8.3 | 21.46 | 1 | 1 | 0.69 | |
| Март | | 1 | 5.3 | 0.32 | 5 | 6 | 2.2 | | | | |
| Апрель | | 1 | 6 | 0.62 | 4 | 6.9 | 4.04 | | 1 | 0.62 | |
| Май | | | | | 8 | 7.9 | 11.26 | | 1 | 0.43 | |
| Июнь | | | | | 10 | 6.8 | 10.69 | | 1 | 0.54 | |
| Июль | | | | | 11 | 7.1 | 9.64 | | | | |
| Август | | | | | 4 | 7.7 | 5.29 | | | | |
| Сентябрь | | | | | 3 | 5.3 | 1.13 | | | | |
| Октябрь | | | | | | | | | | | |
| Ноябрь | | 1 | 4.1 | 0.07 | 4 | 4.9 | 0.68 | | | | |
| Декабрь | | | | | 1 | 4.6 | 0.18 | | | | |
| Всего за год | | 3 | | 1.01 | 65 | | 78.48 | 1 | 4 | 2.28 | |

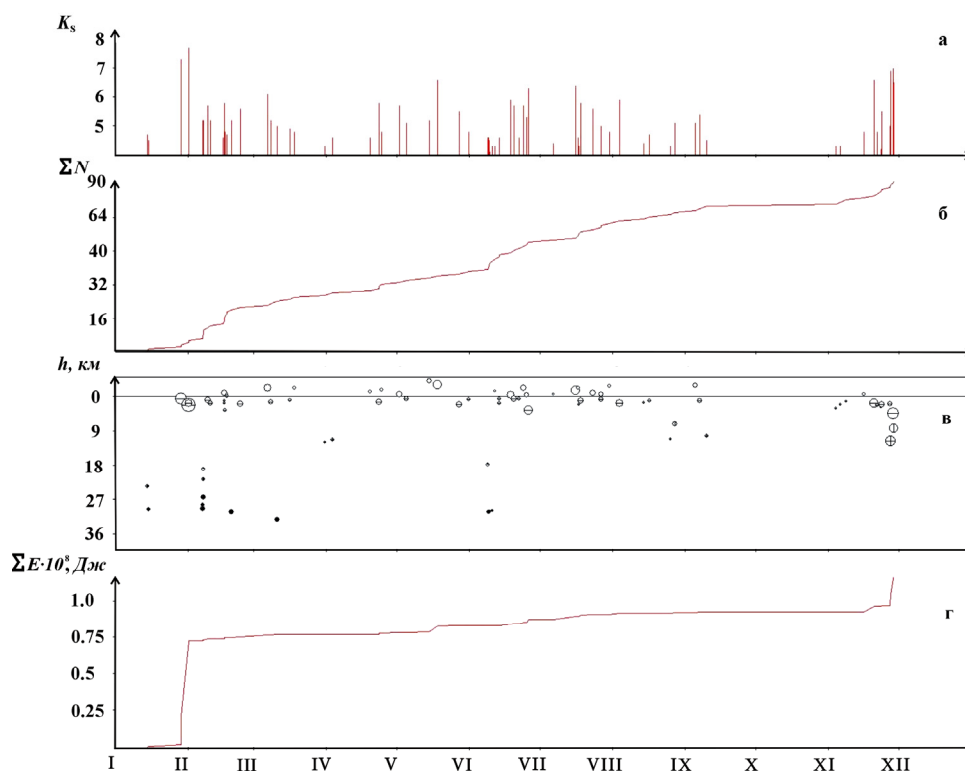


Рис. 8. Графики распределения во времени характеристик (энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б); глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г)) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в 1999 г. в радиусе 10 км (рис. 2) от вулканов Крестовский и Ушковский

Сейсмичность Авачинской группы вулканов в 1996–1999 гг. Вулканы Авачинский и Корякский расположены в 30 км к северу от самых больших городов Камчатки Петропавловск-Камчатский и Елизово и поэтому представляют наибольшую опасность для населения. Весь район № 2, изображенный на рис. 1, является областью уверенной регистрации для землетрясений с $K_S \geq 4.0$.

В 1996 г. была расконсервирована и введена в строй телеметрическая сейсмическая станция «Коряка» (рис. 9 а), что повысило точность определения координат очагов землетрясений в районе вулкана Корякский. Координаты гипоцентров для Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались по программе [23]. В наст. сб. приведен каталог вулканических землетрясений Авачинской группы вулканов за 1994–1999 гг. [32]. Общая карта распределения эпицентров и разрез представлены на рис. 9.

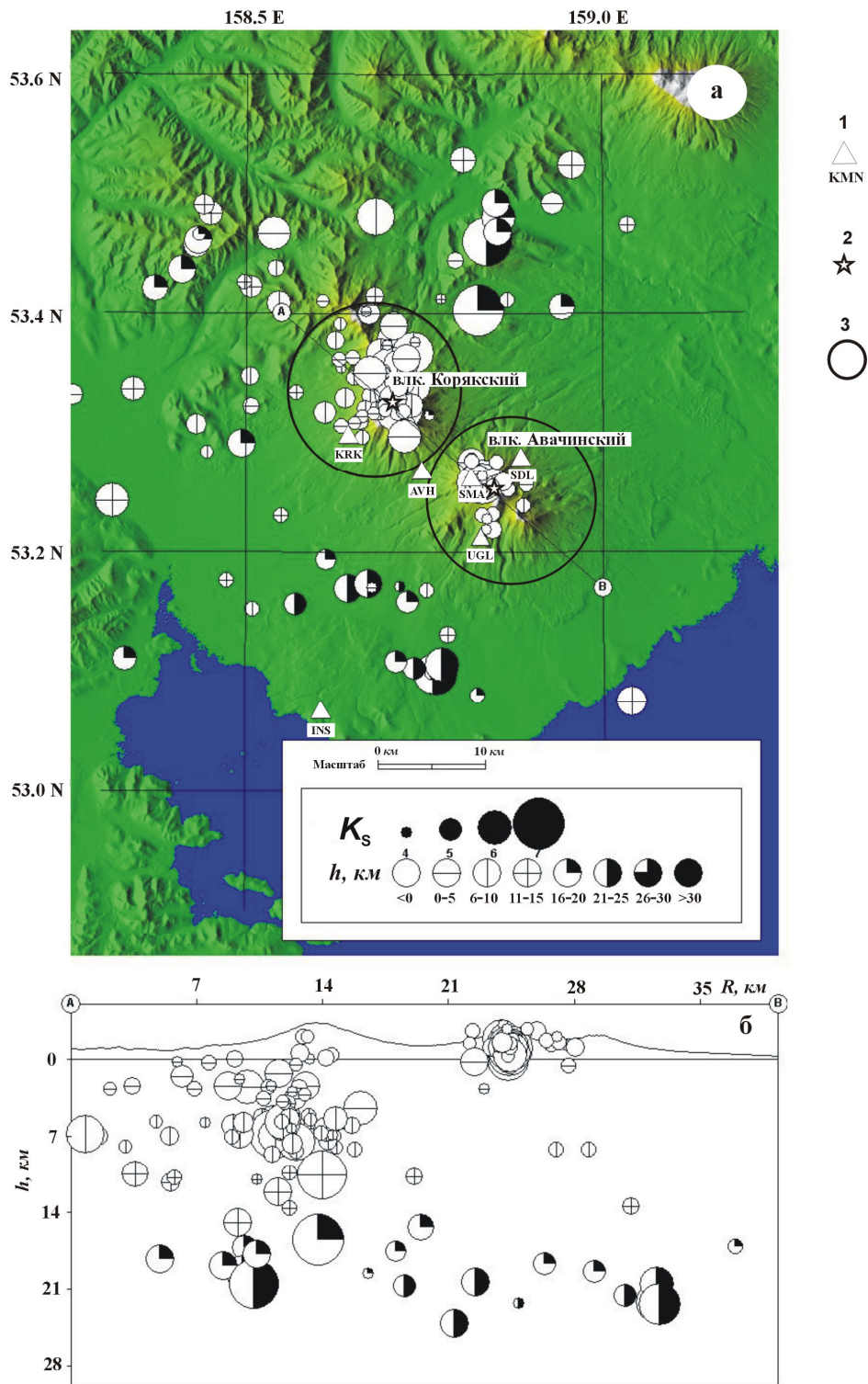


Рис. 9. Карта эпицентров (а) и вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 2
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность возле вулкана соответствует радиусу выборки исходных данных для построения графиков сейсмической активности (вулкан Корякский – 8 км, вулкан Авачинский – 8 км).

В 1996–1999 гг. вулканической активности на вулканах Авачинский и Корякский отмечено не было. На рис. 10, 11 приведено распределение сейсмичности для Авачинского и Корякского вулканов в течение исследуемого периода, которую можно рассматривать как фоновую.

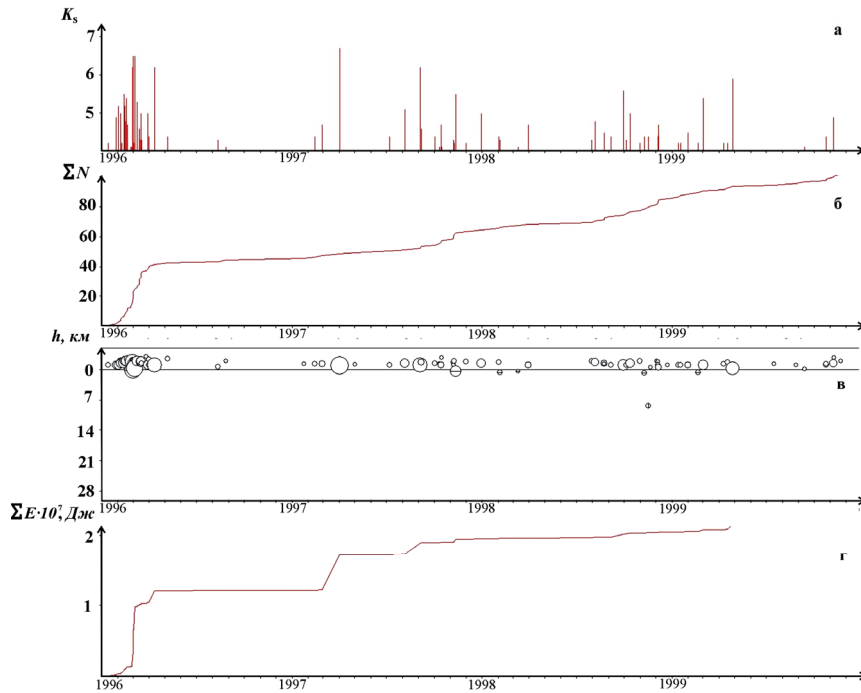


Рис. 10. Графики распределения во времени характеристик (энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б); глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г)) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в 1999 г. в радиусе 8 км (рис. 9) от вулкана Авачинский

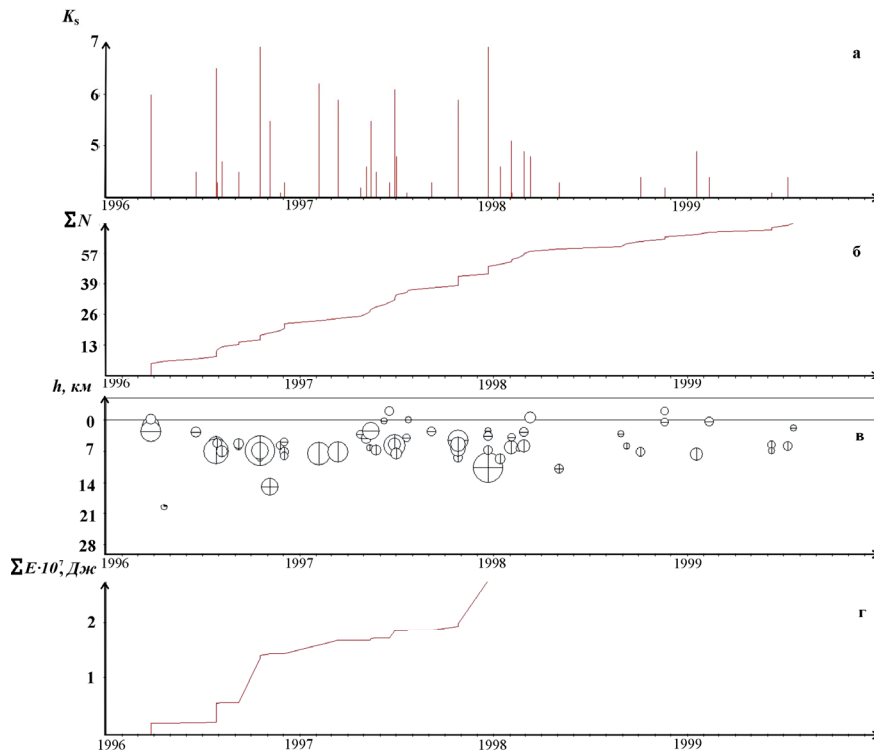


Рис. 11. Графики распределения во времени характеристик (энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б); глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г)) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в 1999 г. в радиусе 8 км от вулкана Корякский

Данные о вулканических землетрясениях за текущий год доступны всем пользователям Интернета по адресу: <http://data.emsd.iks.ru/klyquake/index.htm>.

Л и т е р а т у р а

1. **Действующие вулканы Камчатки Т. 1.** / Под ред. Федотова С.А., Масуренкова Ю.П. – М.: Наука, 1991. — С. 84–97.
2. **Кириянов В.Ю.** Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной вулканической опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. – 1992. – № 3. – С. 16–36.
3. **Кириянов 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. – Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 408–423.
4. **Сеньюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. – С. 279–291.
5. **Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я., Дрознин Д.В.** Опыт выделения пепловых выбросов и оценка их высоты по сейсмическим данным на примере вулкана Шивелуч (Камчатка) // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. – С. 292–300.
6. **Соколов Н.Е.** Начало работы на сейсмической станции в с. Ключи на Камчатке // Бюллетень вулканологических станций. – 1949. – № 16. – С. 20–21.
7. **Горшков Г.С.** Сейсмические наблюдения в с. Ключи (с 28 августа по 31 декабря 1948 г.) // Бюллетень вулканологических станций. – 1953. – № 19. – С. 13–31.
8. **Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е.** Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения за 1955–1963 гг. – М.: Наука, 1965. – 172 с.
9. **Токарев П.И.** Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
10. **Ризниченко Ю.В.** Методы массового определения координат очагов землетрясений // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1958. – № 4. – С. 425–437.
11. **Токарев П.И.** Сейсмичность района северной группы вулканов Камчатки // Бюллетень вулканологических станций. – 1965. – № 39. – С. 35–46.
12. **Токарев П.И.** Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. – М.: Наука, 1966. – 120 с.
13. **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.
14. **Горельчик В.И., Зобин В.М., Токарев П.И.** Сейсмичность вулканов // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 6. – С. 61–77.
15. **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: ДВНЦ АН СССР, 1976. – С. 108–118.
16. **Чубарова О.С., Сеньюков С.Л., Левина В.И.** Вулканические районы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 1994 году. – М.: ОИФЗ РАН, 2000. – С. 103–110.
17. **Чубарова О.С., Левина В.И., Сеньюков С.Л.** Вулканические районы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – С. 105–111.
18. **Токарев П.И.** Предсказание места и времени начала Большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // ДАН СССР. – 1976. – Т. 229. – № 2. – С. 439–442.
19. **Токарев П.И.** Прогноз побочного извержения вулкана Ключевской в марте 1983 г. // Вулканология и сейсмология. – 1983. – № 5. – С. 3–8.
20. **Иванов В.В.** Прогнозы крупных извержений вулканов на Камчатке и их оправдываемость // Вестник ДВО РАН. – 2003. – № 5. – С. 97–108.

21. **Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Левина В.И., Сергеев В.А., Ящук В.В.** Сбор, обработка и хранение сейсмологической информации // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. – С. 43–61.
22. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
23. **Мельников Ю.Ю.** Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 5. – С. 103–112.
24. **Левина В.И., Иванова Е.И., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Шевченко Ю.В.** Камчатка и Командорские острова // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – С. 119–128.
25. **Crosson R.S.** Crustal structure modeling of earthquake data. 1. Simultaneous least square estimation of hypocenter and velocity parameters // J. Geophys. Res. – 1976. – **81**. – № 17. – P. 3036–3046.
26. **Miyachi H. and Moriya T.** Velocity structure beneath the Hidaka mountains in Hokkaido, Japan // J. Phys. Earth. – 1984. – **32**. – № 1. – P. 13–42.
27. **Sato T.** Velocity structure of the crust beneath the northeastern part of Honshu, Japan, as derived from local earthquake data // J. Phys. Earth. – 1979. – **27**. – № 3. – P. 239–253.
28. **Kissling E., Ellsworth W.L., Ederhart-Pillips D., Kradolfer U.** Initial reference models in local earthquake tomography // J. Geophys. Res. – 1994. – **99**. – P. 19635–19646.
29. **Gontovaya L., Stepanova M., Senyukov S., Nizkous I., Gordienko L.** 3D velocity structure of Kluchevskoi volcano group (Kamchatka) // Geophysical Res/ abstracts. – 2004. – **6**. – (EGU General Assembly 2004, ISSN: 1029–7006, Nice, France, 25–30 April, 2004).
30. **Сенюков С.Л.** Скоростные модели вулкана Карымский по данным локальных землетрясений // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 1. – С. 54–63.
31. **Сенюков С.Л. (отв. сост.), Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю.** Северная группа вулканов. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
32. **Сенюков С.Л. (отв. сост.), Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю.** Авачинская группа вулканов. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).