

УДК 550.34

## К истории развития сейсмологических исследований на вулканах Камчатки

**В.И.Горельчик**

*Опубликовано:* Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск -Камчатский, 2001 г., 428с.; УДК 551.21+552+550.34

Приведены краткая история развития и основные результаты сейсмологических исследований на вулканах Камчатки в XX веке. Рассматриваются вопросы формирования представлений о связи сейсмичности и вулканизма, изучения сейсмической активности, отражающей современную деятельность вулканов, исследования глубинного строения питающих магматических систем и физических свойств среды в районах извержений. При составлении обзора внимание акцентировалось на публикациях, положивших начало исследованиям по перечисленным направлениям, а также на работах, выполненных авторами, являющимися сотрудниками Института вулканической геологии и геохимии.

В статье приведены краткая история развития и основные результаты сейсмологических исследований на вулканах Камчатки в XX веке. Особое внимание акцентируется на формировании представлений о связи сейсмичности и вулканизма, на изучении сейсмической активности, отражающей современную магматическую деятельность вулканов, исследовании глубинного строения питающих магматических систем и физических свойств среды в районах извержений. При составлении обзора в первую очередь рассматривались публикации, положившие начало исследованиям по перечисленным направлениям, а также работы, выполненные за последние 10 лет авторами, являющимися сотрудниками Института вулканической геологии и геохимии ДВО РАН.

**Краткая история развития сейсмологических наблюдений.** Инструментальные сейсмологические наблюдения за сейсмическим режимом активных вулканов начались в 1946 г. на севере Камчатки, со времени открытия в поселке Ключи первой сейсмической станции. К началу 1962 г. в районе Северной группы вулканов работали три постоянные сейсмические станции, которые вошли в создававшуюся в эти годы региональную сеть станций Камчатки. В настоящее время в районе Северной группы вулканов существует сеть из 10 радиотелеметрических станций, с конца 1996 г. ведется цифровая регистрация.

С 1964 г. началась регистрация на сейсмической станции Авача у подножия Авачинского вулкана (Южная Камчатка), расположенного в 30 км от г.Петропавловск-Камчатский. С 1996 г. в районе Авачинско-Корякской группы вулканов работает пять радиотелеметрических станций с цифровой регистрацией.

Сейсмологические наблюдения в районе Карымского вулкана с 1965 г. проводились эпизодически с помощью временных сейсмических станций, в 1970 г. была организована непрерывная регистрация в 3,4 км от вулкана. В настоящее время вместо этой станции работает установленная в 1,7 км от вулкана радиотелеметрическая станция с цифровой регистрацией.

Описание основных этапов развития сейсмометрических наблюдений на Камчатке можно найти в работе [54]. С 1974 г. все инструментальные сейсмологические наблюдения на Камчатке осуществляются Комплексной опытно-методической партией Геофизической службы Российской Академии Наук.

В 1991 г. на Камчатке был организован Институт вулканической геологии и геохимии, в котором работает научно-исследовательская группа вулканической сейсмологии в составе В.А.Широков, В.И.Горельчик, О.С.Чубаровой и А.В.Сторчеуса.

**Некоторые результаты работ 1946-1990 гг.** Начало научным исследованиям сейсмичности вулканов Камчатки было положено в трудах российских вулканологов В.И.Влодавца, Б.И.Пийпа, Г.С.Горшкова, П.И.Токарева. Особого внимания заслуживают работы Г.С.Горшкова и П.И.Токарева, в которых были изложены и интерпретировались первые данные о сейсмичности вулканов Северной Камчатки и которые на долгое время стали "учебными пособиями" для не одного поколения камчатских вулканологов-сейсмологов. В статьях Г.С. Горшкова дано первое описание вулканического дрожания и различных типов вулканических землетрясений, предлагалось ввести широко распространенный в настоящее время термин "вулcano-тектоническое землетрясение", отмечена определяющая роль глубины очагов в различиях между типами землетрясений, указывалось на возможность прогноза места и силы извержений вулканов по сейсмологическим данным [16-20,75]. С поразительной интуицией, основываясь на весьма ограниченном материале, Г.С.Горшков сделал основополагающие предположения о том, что питающая магматическая система Ключевского вулкана должна протягиваться до низов коры и уходить в верхнюю мантию. Предложенная Г.С.Горшковым методика обнаружения магматических очагов вулканов по затуханию сейсмических волн от землетрясений получила признание во всем мире [20,75].

Первой монографией в российской вулканической сейсмологии явилась опубликованная в 1966 г. книга П.И.Токарева "Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы" [28]. Книга посвящена изучению землетрясений, связанных с деятельностью вулканов Безымянный и Ключевской, выявлению закономерностей их связи с извержениями, разработке методики прогноза извержений по сейсмическим данным. В последующих публикациях были подробно рассмотрены сейсмические явления, предвращавшие и сопровождавшие катастрофическое извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. [21,29,30,79], побочные извержения вулкана Ключевской в 1966 и 1974 гг. В работах [23,45,76]. Были описаны первые результаты сейсмологических исследований вулканов Карымский [42,44,57] и Авачинский [3,43]. Было показано, что сейсмичность ближайшего к г.Петропавловск-Камчатский Авачинского вулкана в спокойный период представлена очень слабыми неглубокими землетрясениями, происходящими в вулканической постройке и вулканогенно-осадочном слое на глубине не более 2-5 км. На основании проведения опытно-методических работ было сделано заключение о том, что для повышения эффективности слежения за сейсмическим режимом вулкана и оценок его состояния целесообразно использование высокочувствительного канала [3]. Была выявлена зависимость сейсмического режима от космических факторов, выражающаяся в существовании суточной, сезонной и одиннадцатилетней цикличности землетрясений, закономерном смещении во времени летних и осенне-зимних максимумов сейсмической активности внутри одиннадцатилетнего цикла солнечной активности [43].

В 60-70<sup>ые</sup> годы вышла серия работ, содержащих результаты исследований глубинного строения вулканических аппаратов, полученные при использовании накапливающихся данных развивающихся на Камчатке детальных сейсмологических наблюдений. Предложенная Г.С.Горшковым идея была развита С.А.Федотовым и А.И.Фарберовым [47], А.И.Фарберовым и В.И.Горельчик [11,46,66], использовавшими для просвечивания Авачинского вулкана волны от близких землетрясений. По аналогичной методике глубинное строение "корней" вулканов Ключевской группы исследовалось в работах [41,55,56,70]. В этих работах сообщалось об обнаружении в определенных областях участка верхней мантии между земной корой и фокальным слоем зон аномального затухания короткопериодных Р и S волн, которые могли быть отождествлены с объемами, частично заполненными расплавом. Существенным оказалось и то, что аномальные зоны совпадали в плане и перекрывались в большом диапазоне глубин с асейсмичными участками, выявленными при детальном исследовании сейсмичности в районе вулканов, то-есть характеризовались пониженной вязкостью вещества [1,67].

Вопросы тектоники и вулканизма и связанной с ними сейсмичности Южной Камчатки и района Ключевской группы вулканов рассматривались в работах [2,22]. Тогда же, в 70<sup>ые</sup> годы, под руководством В.И.Горельчик было начато создание каталога землетрясений района Северной группы вулканов, в основу которого было положено использование для определения координат очагов не общекамчатского, как ранее, а местного годографа сейсмических волн [8], рассчитанного для шестислойной модели земной коры с учетом данных ГСЗ.

Были получены результаты, подтверждающие, что сейсмичность фокального слоя и вулканизм взаимосвязаны и порождены единым глубинным процессом [31,32,77]. В.А.Широков [60,61] обнаружил, что возникновение групп землетрясений с промежуточной глубиной очага в районе вулканов является характерным и необходимым (но недостаточным) признаком сейсмической подготовки всех крупных (с объемом продуктов более 0,05 км<sup>3</sup>) извержений Камчатки и Курильских островов.

Проблемы прогноза вулканических извержений обсуждались в работах [34,40,78]. П.И.Токарев первым начал создавать на Камчатке оперативную службу прогноза извержений. Непрерывное слежение за сейсмическим режимом вулканов и оперативный анализ данных, положенные в основу сейсмологического метода прогноза, позволили П.И.Токареву предвидеть извержения вулкана Безымянный в октябре 1959, в апреле 1960 и марте 1961 гг., гигантское извержение вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г., предсказать место и время начала извержения новых Толбачинских вулканов в июле 1975 г. [33]. Позднее, в 1983 г., было успешно предсказано побочное извержение Ключевского вулкана (прорыв Предсказанный) [36]. С целью решения проблемы прогноза места, времени, энергии и опасности больших взрывов андезитовых вулканов П.И.Токаревым был выполнен сравнительный анализ явлений, связанных с пароксизмальными взрывами вулканов Шивелуч, Безымянный и Сент-Хеленс [37]. Обобщению сейсмических характеристик побочных извержений Ключевского вулкана и вопросам их комплексного прогноза посвящены статьи [38,61].

Серьезным этапом в развитии российской вулканической сейсмологии явилось Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-1976 гг. (БТТИ), начало и дальнейшее течение которого были успешно спрогнозированы по сейсмологическим данным [33,51]. Результаты детальных исследований пространственно-временных особенностей сейсмичности, механизма и очаговых параметров землетрясений, связанных с извержением [13,48,49,51-53,68], внесли вклад не только в изучение механизма БТТИ, но и способствовали прояснению некоторых вопросов магматического питания всей Ключевской группы вулканов [53].

В 1981 г. вышла из печати книга П.И. Токарева "Вулканические землетрясения Камчатки" [35], содержащая каталог из более чем 40 тыс. землетрясений, зарегистрированных сейсмостанцией "Ключи" на вулканах Шивелуч (1958-1970 гг.), Ключевской (1955-1970 гг.) и Безымянный (1955-1970 гг.).

Возросшая детальность сейсмологических наблюдений в районе Ключевской группы вулканов позволила провести исследование сейсмической активности вулкана Безымянный на новом этапе развития внутрикратерного экстрезивного

купола. Этап начался с 1977 г. и характеризовался переходом от экструзивно-эксплозивных извержений к эксплозивно-эффузивным [59].

Результаты детального исследования пространственно-временных и динамических характеристик землетрясений, связанных с побочными извержениями Ключевского вулкана в 1974 и 1983 гг., исследовались в работах [4-6,23,71,76]. Обобщенные результаты изучения сейсмичности района Ключевской группы вулканов за 1971-1983 гг. приведены в работе [14]. Показана зависимость особенностей пространственно-временных соотношений вулканической и сейсмической активности от глубинного строения зон питания вулканов с различным химическим составом продуктов извержений. Итоги двадцатилетних наблюдений (1965 - 1985 гг.) за сейсмическим режимом Карымского вулкана были подведены в статье [39].

На примере района Ключевской группы вулканов О.С.Чубаровой было начато изучение сейсмического процесса с позиций дискретной иерархической модели геофизической среды [24,65]. Было доказано, что временная структура сейсмического процесса является многоуровневой, самоподобной, характеризующейся фрактальной размерностью  $D = 0,56-0,62$  для локальных зон и  $D = 0,67-0,70$  для района в целом.

В обзорных статьях [12,73] были суммированы основные характеристики сейсмичности районов активных вулканов и вулканических землетрясений: локальный и преимущественно роевый характер возникновения землетрясений; малая величина предельной магнитуды (до 5,5-6); повторение групп и роев землетрясений в одних и тех же сейсмоактивных зонах; большое количество поверхностных и относительно слабых событий и, как следствие, повышенные значения коэффициента  $\gamma$  (или  $b$ ) в распределении числа землетрясений по энергии; наличие более длиннопериодного излучения очагов вулканических землетрясений по сравнению с тектоническими землетрясениями такой же силы. Отмечалось сходство в поведении коэффициента  $\gamma$  землетрясений и параметра плотности сейсмогенных разрывов в процессах подготовки и развития извержений и перед сильными землетрясениями, а также на сдвиговый характер подвижек в очагах вулканических и тектонических землетрясений, что являлось подтверждением предположения об аналогии процессов разрушения на разных масштабных уровнях, управляемых единым физическим механизмом.

По данным локальной сети были исследованы особенности сейсмичности и глубинное строение вулкана Карымский, под которым в земной коре на глубине порядка 4 км была выделена асейсмичная область радиусом около 2,5-3 км, отождествляемая с периферическим магматическим очагом [63]. Характеристики извержений и сейсмического режима Карымского вулкана за период 1965-1986 гг. обобщены П.И.Токаревым [39].

Результаты детальных сейсмологических наблюдений сейсмичности Ключевского вулкана за 1978-1987 гг. были положены в основу построения модели деятельности питающей его магматической системы [50,58,62,69].

### ***Современные исследования в области вулканической сейсмологии в Институте вулканической геологии и геохимии ДВО РАН (1991-2000 гг.)***

Со времени организации Института вулканической геологии и геохимии в 1991 г. работы в группе вулканической сейсмологии проводились и проводятся по следующим основным направлениям:

- Разработка и совершенствование методов обработки сейсмологической информации с целью получения детальных данных, являющихся основой для фундаментальных и прикладных исследований сейсмичности вулканического процесса (В.И.Горельчик, О.С.Чубарова).
- Создание и заполнение базы данных "Вулканические землетрясения Камчатки" (О.С.Чубарова).
- Исследование пространственно-временных закономерностей сейсмичности вулканов Северной группы с целью выявления новых и совершенствования существующих предвестников извержений, изучения глубинного строения вулканических аппаратов, построения моделей вулканического процесса (В.И.Горельчик, О.С.Чубарова, А.В.Сторчеус, В.А.Широков). 4
- Участие в работе группы KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) в рамках международной программы по обеспечению безопасности полетов (О.С.Чубарова).

### ***Результаты работ***

- Модернизирована и приспособлена для IBM PC программа определения гипоцентров и энергетических характеристик землетрясений, разработанная совместно с Объединенным Институтом физики Земли [27], использующая принятую еще в 70-е годы шестислойную модель земной коры. По этой программе выполнено и продолжает выполняться переопределение очагов землетрясений, координаты которых были рассчитаны ранее вручную.
- Спроектирована структура и производится заполнение в СУБД FoxPRO базы данных, представляющей систему взаимосвязанных файлов, которая позволяет представить результаты детальных сейсмологических исследований в районе Северной группы вулканов Камчатки в виде комплексной информации. В настоящее время в базе данных имеется достаточно однородный каталог, содержащий подробные данные по ~ 10000 коровых вулканических и тектонических землетрясений района Северной группы вулканов за 1976-1996 гг. Производится компьютерная обработка материалов 1971-1975 гг., обработанных ранее вручную.

Полученный непрерывный ряд наблюдений за два десятилетия позволил уточнить и расширить существующие представления о сейсмичности Северной группы вулканов.

**Ключевской вулкан.** В предыдущих работах [50;62] на основе сейсмологических данных за 1978-1987 гг. отмечалось, что в земной коре под Ключевским вулканом существует зона трещиноватости, круто уходящая вниз от дневной поверхности до переходного от коры к мантии слоя, отождествляемая с питающей магматической системой. Крупных (с поперечными размерами более 3 км) магматических тел в земной коре под вулканом не обнаружено. В ряде случаев отмечалась миграция очагов землетрясений с глубин ~ 20-30 км почти до дневной поверхности перед усилениями активности центрального кратера или побочными извержениями.

В результате пространственно-временного анализа сейсмической активности в зависимости от состояния Ключевского вулкана за последние 20 лет (1976-1996 гг.) по уровню и характеру проявления сейсмичности в земной коре под вулканом были выделены четыре основных сейсмоактивных горизонта и определены основные характеристики этих слоев [6]. В интервале глубин от дневной поверхности до 20 км происходят, главным образом, вулcano-тектонические (ВТ) землетрясения, возникающие под действием непрерывно меняющегося поля напряжений, создаваемого вокруг магматических каналов, очагов и внедряющихся в вулканическую постройку систем даек и силлов. Как показало изучение пространственного распределения землетрясений в средних горизонтах земной коры (интервал глубин 5-20 км) в зависимости от различных стадий состояния вулкана, эти землетрясения являются индикаторами перераспределения напряжений в среде, вмещающей питающую магматическую систему Ключевского вулкана и, и, по всей видимости, взаимосвязанные магматические системы других вулканов Ключевской группы [10]. Землетрясения в нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое (интервал глубин 20-40 км) под Ключевским вулканом выявлена зона с аномальными физическими свойствами [8,9,10,72] и пониженную скорость (устное сообщение проф. Йельского университета (США) Jh. Lees, 1999). Установлено, что в этой зоне существует длительно действующий источник генерации глубоких длиннопериодных (ГДП) землетрясений (собственная частота  $F_0 = 2-3$  НЗ), имеющих иную генетическую природу, чем ВТ и тектонические землетрясения [10]. Предполагается, что в интервале глубин 20-40 км под Ключевским вулканом может находиться верхняя часть диапира, представляющая собой систему мелких заполненных расплавом трещин, в которой происходит быстрая смена физико-химических состояний. Проверяется соответствие предложенной А.В.Сторчеусом гипотезы происхождения ГДП землетрясений под Ключевским вулканом наблюдаемым фактическим данным [10].

**Вулкан Безымянный.** Исследована сейсмичность вулкана Безымянный (1971-1994гг.) на современном этапе эруптивного цикла. С момента катастрофического взрыва 30 марта 1956 г. вулкан находится в стадии роста внутрикратерного экструзивного купола Новый, сопровождающейся эксплозиями различной силы, скатыванием раскаленных каменных лавин, образованием пирокластических, и, начиная с 1977 г., лавовых потоков [59]. Извержения предваряются и сопровождаются специфическими близповерхностными землетрясениями. Характерной особенностью эксплозивно-эффузивного периода 1977-1994 гг. является, начиная с 1981 г, возникновение землетрясений с аномально большой длительностью, связанных с активными процессами деформации и разрушения купола и сходом каменных лавин [64]. Пароксизмальная фаза извержений, в большинстве случаев, характеризуется спазматическим вулканическим дрожанием, связанным с образованием пирокластических потоков. По сделанным О.С.Чубаровой грубым оценкам, сейсмическая энергия спазматического дрожания на порядок и более превосходит энергию землетрясений, связанных с тем же извержением. Линейный размер сейсмоактивной зоны вулкана Безымянный достигает ~ 15 км. Все землетрясения этой зоны за рассматриваемый период происходили на глубинах не более 5-6 км, что может быть связано с существованием магматических очагов (или очага) в верхних и средних горизонтах земной коры. Энергия землетрясений, связанных с извержениями вулкана Безымянный за период 1971-1994 гг., была меньше, чем на начальной стадии эруптивного цикла. В 1955-1956 гг. несколько землетрясений имели магнитуду  $M = 5$ , в 1957-1970 гг. величина  $M$  достигала 3, а за последние десятилетия только одно наиболее сильное землетрясение с  $M = 2$  произошло в 1977 г. перед извержением, в процессе которого впервые был излит лавовый поток. Кратковременность или почти полное отсутствие сейсмической подготовки на уровне выше  $M = 0$ , который обеспечивается ближайшей сейсмостанцией, не позволяют, как в 50-60<sup>ые</sup> годы, прогнозировать извержения вулкана Безымянный по сейсмологическим данным [64].

**Вулкан Шивелуч.** На основании данных детальных сейсмологических наблюдений за 1962-1997 гг. проанализирована связь между коровой и мантийной сейсмичностью и активностью вулкана [15,74]. Изучена конфигурация сейсмофокальной зоны, которая под районом вулкана состоит из двух пересекающихся и несколько смещенных относительно друг друга слоев. Несколько более пологое падение сейсмофокального слоя на глубинах 30-110 км ( $\alpha = 50^\circ$ ) сменяется на более крутое на глубинах 70-200 км ( $\alpha = 68^\circ$ ). Приходящийся на глубины 90-110 км излом совпадает с проекцией вулкана Шивелуч на сейсмофокальную поверхность. Эти глубины являются наименьшими среди аналогичных глубин для всех действующих вулканов Камчатки. Для периода экструзивно-эксплозивного извержения вулкана (1980-1994 гг.) выявлена прямая зависимость вулканической активности от уровня сейсмичности на глубинах 100-120 км. Эти данные позволяют предположить, что процессы магнообразования в мантийном клине и "подпитка" корового очага вулкана связаны с глубинами не менее 100 км. Пространственно-временное распределение очагов землетрясений и их связь с вулканической активностью подтверждают и дополняют петролого-геохимические представления о мантийно-коровом питании вулкана Шивелуч. Сделан вывод, что заметные изменения уровня сейсмичности на глубинах 100-200 км в районе вулкана должны влиять на усиление или ослабление его активности. Наиболее сильное после 1964 г. извержение в апреле 1993 г. было успешно предсказано по комплексу данных о динамике сейсмичности в земной коре и верхней мантии.

**Исследование скоростного строения и напряженно-деформированного состояния среды в районе активных вулканов по сейсмологическим данным.** Работы по этому направлению выполнялись совместно с Объединенным Институтом физики Земли РАН. Объект исследований - районы Большого трещинного Толбачинского извержения и всей Ключевской группы вулканов. Разработанная авторами методика слежения за изменениями различных физических характеристик среды под воздействием поля напряжений опробована при исследовании процесса подготовки и развития БТТИ в 1975 г. В качестве исходных данных использовались времена пробега Р и S волн от слабых землетрясений из района расположения сейсмических станций и вулканов. При слежении за параметром  $\tau$ , вычисляемом аналитически как отношение времен пробега волн Р и S волн, зарегистрированных единичной сейсмической станцией, были получены краткосрочный предвестник (прогностическая кривая) и средне-долгосрочный предвестник (суммарные карты распределения параметра  $\tau$  по площади и изменение карт во времени). Предвестники предвещали отдельные переломные моменты в развитии извержения. По параметру  $\tau$ , прямо связанному с полем напряжений, были вычислены среднее давление, ориентация главных осей деформации и осуществлен их мониторинг. Показано хорошее совпадение полученных результатов с данными геолого-геофизических и вулканологических наблюдений, выполненных в период извержения. Это обстоятельство является подтверждением того, что предложенный комплекс алгоритмов и программ может быть с успехом использован для прогноза землетрясений [26].

На основе использования созданного в группе вулканической сейсмологии каталога местных землетрясений района Северной группы вулканов и комплексного метода реконструкции трехмерного скоростного строения и восстановления напряженно-деформированного состояния среды получены новые данные о структуре скоростного поля и напряженно-деформированного состояния земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки, включая зону БТТИ [25]. Обнаруженные зоны повышенных и пониженных скоростей хорошо согласуются с известными по геологическим данным структурами. В центральной части района располагается область пониженных скоростей, которую пересекает сквозькоровый разлом, проходящий через действующие вулканы центрального типа и зоны ареального вулканизма, и является основной магмоподводящей структурой, контролирующей современную вулканическую деятельность Ключевской группы вулканов. В целом скоростной разрез вкост вулканов Ключевской и Безымянный более высокоскоростной, чем в районе вулкана Плоский Толбачик и Северного и Южного прорывов БТТИ. Выявлены специфические физические свойства среды в Толудской сейсмоактивной зоне (область к востоку и юго - востоку от вулкана Плоский Толбачик) - сохраняющиеся до глубин 15 км пониженные скорости и положительные величины среднего давления, свидетельствующие о существовании здесь значительной области разуплотнения. Эти свойства обусловили отток в нее магмы во время развития трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. и образования провальной кальдеры в вершинном кратере Плоского Толбачика.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горельчик В.И. Распределение очагов землетрясений в районе Авачинско-Корякской и Жупановской групп вулканов в 1964-1967 гг. // Бюлл. вулканол. ст.1970. N 46. С.9-14.
- Горельчик В.И. Сейсмичность Южной Камчатки // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке / Ред. С.А.Федотов. Новосибирск: Наука, 1974. С.52-62.
- Горельчик В.И. О регистрации слабых вулканических землетрясений в районе Авачинского вулкана // Бюлл. вулканол. ст.1978. N 54. С.9-21.
- Горельчик В.И. Сейсмическая активность Ключевского вулкана в период подготовки и развития прорыва "Предсказанный" в марте-июле 1983 года // Вулканология и сейсмология. 1985. N 1. С.71-87.
- Горельчик В.И. Разработка и опробование системы прогноза вулканических извержений на Камчатке: Отчет о НИР (заключит.) // ВНИЦентр; ГР 81068164; Инв. N 528. М., 1986, Гл.3 ,4. С.63-227.
- Горельчик В.И., Гарбузова В.Т. Сейсмическая активность Ключевского вулкана как отражение его магматической деятельности (наст. сборник).
- Горельчик В.И., Левина В.И. Пространственно-временные и динамические характеристики землетрясений, связанных с извержением Ключевского вулкана в 1974 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. N 6. С.59-79.
- 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.198-218.
- Горельчик В.И., Сторчеус А.В. О длиннопериодных вулканических землетрясениях в нижних горизонтах земной коры и переходном от коры к мантии слое под Ключевским вулканом // Материалы научно-практической конференции "Проблемы сейсмичности Дальнего Востока, новая карта сейсмического районирования ОСР-97, ее роль и значение для Петропавловска-Камчатского и области". Петропавловск-Камчатский, 6-9 апреля, 1999. С.73.
- Горельчик В.И., Сторчеус А.В. Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом. Камчатка. наст. сборник.
- Горельчик В.И., Фарберов А.И. Некоторые особенности строения вулканических областей по сейсмологическим данным // Материалы III Всесоюз. вулканол. совещ. "Вулканизм и глубины Земли". М.: Наука, 1971. С.107-113.
- Горельчик В.И., Зобин В.М., Токарев П.И. Сейсмичность вулканов // Вулканология и сейсмология. 1987. N 6. С.16-77.
- Горельчик В.И., Зобин В.М., Чубарова О.С. Сейсмичность и динамические параметры очагов землетрясений в районе Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975-1978 гг. // Вулканология и сейсмология. 1981. N 3. С.73-98.
- Горельчик В.И., Чубарова О.С., Гарбузова В.Т. Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки, 1971-1983 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. N 1. С.90-100.
- Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Дроздин Д.В., Левина В.И., Фирстов П.П., Чубарова О.С., Широков В.А. Вулкан Шивелуч: глубинное строение и прогноз извержения по данным детальной сейсмичности 1962-1994 гг. // Вулканология и

сейсмология. 1995. N 4-5. С.54-75.

- Горшков Г.С. Сейсмические наблюдения в селе Ключи (с 28 августа по 31 декабря 1948 г.) // Бюлл. вулканол. станций. 1953. N 19. С.13-31.
- Горшков Г.С. Сейсмические наблюдения в 1949 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1954. N 21. С.19-39.
- Горшков Г.С. Сейсмические наблюдения в первой половине 1951г. // Бюлл. вулканол. станций. 1954. N 23. С.24-31.
- Горшков Г.С. Вулканическое дрожание, связанное с прорывом кратера Былинкиной // Бюлл. вулканол. станций. 1954. N 23. С.31-37.
- Горшков Г.С. О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т.106. N 4. С.703-705.
- Зобин В.М. Механизм вулканических землетрясений, связанных с извержением вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. N 3. С.31-36.
- Иванов Б.В., Горельчик В.И. Тектоника, сейсмичность и вулканизм района Ключевской группы вулканов // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов / Ред. Б.В. Иванов, С.Т. Балеста. Владивосток, 1976. С.42-51.
- Иванов Б.В., Андреев В.Н., Горельчик В.И., Максимов А.П., Степанов В.В., Чирков А.М. Извержение Ключевской сопки в 1972-1974 гг. и образование побочных кратеров на юго-западном склоне вулкана // Геодинамика и вулканизм островных дуг северо-западного сектора тихоокеанского кольца. М.: Сов. Радио, 1978. С.90-104.
- Рыкунов Л.Н., Смирнов В.Б., Старовойт Ю.О., Чубарова О.С. Самоподобие сейсмического излучения во времени // Докл. АН СССР. 1987. Т.297. N 6. С.1337-1341.
- Славина Л.Б., Гарагаиш И.А., Горельчик В.И., Иванов Б. В., Белянкин Г. А. Состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2001. N 1. С.49-59.
- Славина Л.Б., Гарагаиш И.А., Мячкин В.В., Горельчик В.И., Соловьев Н.В. Изменение напряженно-деформированного состояния и кинематических параметров среды во время Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1999. N 1. С.79-86.
- Сургучев П.И., Горельчик В.И., Левина В.И., Мячкин В.В. Массовое определение гипоцентров землетрясений на ЭВМ в районе Северной группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1992. N 2. С.50-63.
- Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.
- Токарев П.И. Рой землетрясений вулкана Шивелуч в мае 1964 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1964. N 38. С.41-44.
- Токарев П. И. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 года и его предвестники. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. N 9. С.11-22.
- Токарев П.П. О фокальном слое, сейсмичности и вулканизме Курило-Камчатской зоны. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. N 3. С.15-30.
- Токарев П.П. Сейсмическая активность фокального слоя Камчатки и ее связь с вулканизмом // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке (ред. С.А. Федотов). Новосибирск: Наука. 1974. С.166-76.
- Токарев П.И. Предсказание места и времени начала Большого трещинного Толбачинского извержения в июле 1975 года // Докл АН СССР. 1976. Т.229. N 2. С.439-442.
- Токарев П.И. К методике прогноза извержений вулканов Камчатки по сейсмологическим данным // Бюлл. вулканол. станций. 1977. N 53. С.38-45.
- Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
- Токарев П.И. Прогноз побочного извержения вулкана Ключевского в марте 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1983. N 5. С.3-8.
- Токарев П.И. Прогноз места, времени, энергии и опасности больших взрывов андезитовых вулканов // Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. 27-й Международный геологический Конгресс. Докл. 1984. Т.6. С.66-81.
- Токарев П.И. Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология 1988. N 6. С.47-61.
- Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим Карымского вулкана в 1965-1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1989. N 2. С.3-13.
- Токарев П.П., Горельчик В.И. Сейсмический режим вулканов и прогноз извержений // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке / Ред. С.А. Федотов. Новосибирск: Наука, 1974. С.161-166.
- Токарев П. П., Зобин В.М. Особенности распространения сейсмических волн близких землетрясений в земной коре и верхней мантии в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Бюлл. вулканол. станций. 1970. N 46. С.17-23.
- Токарев П.И., Фирстов П.П. Извержение вулкана Карымского в 1970-1973 гг. Геофизические исследования // Вулканизм островных дуг. М.: Наука, 1977. С.65-77.
- Токарев П.И., Широков В.А. Состояние и сейсмический режим Авачинского вулкана в 1971-1975 гг. // Бюлл. вулканол. станций. 1977. N 53. С.46-52.
- Токарев П.И., Фирстов П.П., Лемзиков В.К. Сейсмологические исследования на вулкане Карымском в 1966 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1969. N 45. С.21-31.
- Токарев П.И., Широков В.А., Зобин В.М. Сейсмические явления, связанные с извержением побочного кратера им. Пийпа в октябре-декабре 1966 года. // Бюлл. вулканол. станций. 1968. N 44. С.30-41.
- Фарберов А.И. Магматические очаги вулканов восточной Камчатки по сейсмологическим данным. Новосибирск: Наука, 1974. 88 с.
- Федотов С.А., Фарберов А.А. Об экранировании поперечных сейсмических волн в магматическом очаге в верхней мантии в районе Авачинской группы вулканов // Вулканизм и глубинное строение Земли. М.: Наука, 1966. С.43-48.
- Федотов С.А., Горельчик В.И., Степанов В.В. Сейсмологические данные о магматических очагах, механизме и развитии Большого Трещинного извержения 1975 г. на Камчатке // Докл. АН СССР. 1976. Т. 228. N 6. С.1407-1410.

- Федотов С.А., Горельчик В.И., Степанов В.В. Сейсмические данные о механизме и развитии Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. (Камчатка) // Докл. АН СССР. 1978. Т.242. С.909-912.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И. Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. N 2. С.3-42.
- Федотов С.А., Горельчик В.И., Степанов В.В., Гарбузова В.Т. Развитие Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975 году по сейсмологическим данным // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975-1976 гг. М.: Наука, 1978. С.135-150.
- Федотов С.А., Горельчик В.И. Степанов В.В., Гарбузова В.Т. Сейсмологические данные о механизме и развитии Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. // Бюлл. вулканол. станций. 1979. N 56. С.3-14.
- Федотов С.А., Горельчик В.И., Зобин В.М., Степанов В.В., Чубарова О.С., Широков В.А. Сейсмологические данные о механизме извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка 1975-976. Гл. XII. М.: Наука, 1984. С.389-447.
- Федотов С.А., Феофилактов В.Д., Гордеев Е.И., Гаврилов В.А., Чебров В.Н. Развитие сейсмометрических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1987. N 6. С.11-28.
- Фирстов П.П., Широков В.А. Локализация корней вулканов Ключевой группы по сейсмическим данным // Вулканизм и глубины Земли. М: Наука, 1971. С.113-117.
- Фирстов П.П., Широков В.А. Влияние корней камчатских вулканов на распространение сейсмических волн близких землетрясений // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С.179-188.
- Фирстов П.П., Лемзиков В.К., Руленко О.П. Сейсмический режим вулкана Карымского (1970-1973 гг.) // Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1977. С.161-179.
- Хренов А.П., Двигало В.Н., Курсанов И.Т., Федотов С.А., Горельчик В.И., Жаринов Н.А. Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки. Т.1. М.: Наука, 1991. С.106-153.
- Чубарова О.С., Горельчик В.И., Гарбузова В.Т. Сейсмический режим вулкана Безымянный, 1975-1979 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. N 3. С.58-69.
- Широков В.А. Связь извержений вулканов Камчатки с землетрясениями верхней мантии. // Бюлл. вулканол. станций. 1978. N 54. С.3-8.
- Широков В.А. Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка). // Вулканология и сейсмология. 1985. N 6. С.48-58.
- Широков В.А. Геодинамические аспекты взаимосвязи сейсмических и вулканических процессов, прогноз сильных землетрясений и вулканических извержений по сейсмологическим данным // Основные результаты научно-исследовательских работ Института вулканической геологии и геохимии за 1991-1996 гг. Петропавловск-Камчатский, 1996. С.73-80.
- Широков В.А., Иванов В.В., Степанов В.В. О глубинном строении вулкана Карымский и особенностях его сейсмичности по данным локальной сети // Вулканология и сейсмология. 1988. N 3. С.71-80.
- Chubarova O.S. Bezumyanny volcano (Kamchatka). Seismic accompaniment of the Novy dome growth in 1971-1994 // Geophysics and Environment. IUGG XXI General Assembly. Boulder, Colorado. July 2-14. Abstracts. Week A. 1995. P.A49.
- Chubarova, O.S. (1995). The structure features of seismicity within the Northern volcanic group region (Kamchatka) // Geophysics and Environment. IUGG XXI General Assembly. Boulder, Colorado. July 2-14. 1995. Abstracts. Week A. P.A359-A360
- Farberov A.I. and Gorelchik V.I. Anomalous Seismic Effect under Volcanoes and Some Features of Deep-seated Structure of Volcanic Areas // Bull. Volcanol. 1971 Tome XXXV-1. P.212-224.
- Farberov A.I., Gorelchik V.I. and Zubkov S.I On Heterogeneities with Reduced Viscosity in the Mantle under the Kamchatka Volcanoes According to Seismological Data // Bull. Volcanol. 1973. Tome XXXVII-1. P.122-133.
- Fedotov S.A., Gorelchik V.I., Stepanov, V.V. Seismological studies on the Mechanism of the large Tolbachik eruption, 1975-1976 // Bull. Volcanol. 1980. V.43. No 1. P.73-84.
- Fedotov S.A., Gorelchik V.I., Zharinov N.A. Deformation, earthquakes and mechanism activity of Klyuchevskoy volcano // Volcanic Seismology (Eds. Gasparini, Scarpa, Aki). IAVCEI. Proc. In Volcanology. 1992. P.20-44.
- Firsov P.P. and Shirokov V.A. Seismic Investigation of the Roots of the Klyuchevskaya Group Volcanoes, Kamchatka // Bull. Volcanol. 1971. Tome XXXV-1. P.164-172.
- Gorelchik V. I. Seismological study of the Klyuchevskoy flank eruption of 1983 (Kamchatka) // Journ. Of Volcanol. and Geotherm. Res. 1989. 38. P.269-280.
- Gorelchik V. I. and Storcheus A.V. Deep long-period earthquakes under Klyuchevskoy volcano (Kamchatka) // Geophysical investigation of the active volcanoes: prognosis and mechanism of volcanic eruption. European Seismological Commission International Workshop. Petropavlovsk-Kamchatsky. September 1998. 1998. P.18-19.
- Gorelchik V.I., Zobin V.M. and Tokarev P.I. Volcanic earthquakes of Kamchatka: classification, nature of source and spatio-temporal distribution // Tectonophysics. 1990. 180. P.255-271.
- Gorelchik V.I., Shirokov V.A., Firsov P.P., Chubarova O.. Shiveluch volcano: seismicity, deep structure and forecasting eruptions ( Kamchatka ) // Journ. of Volcanol. Geotherm. Res. 1997. 78. P.121-132.
- Gorshkov G.S. Some results of seismometric investigations at the Kamchatka Volcanological station // Bull. Volcanol. 1960. Ser.II. Tome XXIII. P.121-128.
- Ivanov B.V, Gorelchik V.I., Andreev V.N., Maksivov A.P., Stepanov V.V. and Chirkov A.M. The 1972-1974 Eruption of Klyuchevskoy Volcano, Kamchatka // Bull. Volcanol. 1981. V.44-1. P.1-10.
- Tokarev P.I. On the focal layer, seismicity and volcanism of the Kurile-Kamchatka zone. Bull. Volcanol . 1971. Tome XXXV. No 1. P.230-240.

- *Tokarev P.I.* Forecasting volcanic eruptions from seismic data // Bull. Volcanol. 1971. Tome XXXV. No 1. P.243-250.
- *Zobin, V.M.* Mechanism of Volcanic Earthquakes of the Sheveluch Volcano, Kamchatka // Bull. Volcanol. 1971. V.35. No 1. P.225-229.

## **On history of the seismological investigations on Kamchatka volcanoes**

### **V.I. Gorelchik**

History and main results of the seismological investigations on Kamchatka volcanoes over the 20th century and nowadays are reviewed here. Formation of our notion of the relationship between seismicity and volcanism, studies of seismic activity reflecting recent volcanic activity, investigation of deep structure of the feeding magmatic systems and physical properties of medium in the eruption areas are presented. When compiling this review we focused upon the publications, which had initiated the above studies and on the works carried out by the collaborators of the Institute of Volcanic Geology and Geochemistry.