

УДК 550.34

ИСТОРИЯ И СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ НА КАМЧАТКЕ

А. А. Гусев^{1,2}, Е. М. Гусева¹

¹ Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

г.Петропавловск- Камчатский

Аннотация. Дан обзор работ по инженерной сейсмологии региона Камчатки более чем за 40 лет. Изучены макросейсмические данные, получены и накоплены записи сильных движений. Установлены региональные связи балльности, амплитуд и спектров с расстоянием и магнитудой. Изучались (для задач СМР) сейсмические свойства грунтовых толщ. Построены характерные для региона формы спектров Фурье и спектров реакции, изучалась длительность колебаний. Результаты анализа макросейсмических данных и теоретические исследования очагов использованы для построения вероятностных оценок сейсмической опасности проведения общего сейсмического районирования. Дан обзор ближайших нерешенных задач камчатской инженерной сейсмологии.

HISTORY AND THE CURRENT STATE OF STUDIES IN ENGINEERING SEISMOLOGY ON KAMCHATKA

A. A. Gusev^{1,2}, E. M. Guseva¹

¹*Kamchatkan Methodical Seismological Department., Geophysical Service, RAS*

²*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russ.Ac.Sci.*

Petropavlovsk-Kamchatsky

Abstract. More than forty years of studies in engineering seismology on Kamchatka are reviewed. Macroseismic data has been analyzed; strong ground motion records were accumulated. For macroseismic intensity, amplitude and spectra, regionally-specific relationships with magnitude and distance have been established. For the sake of seismic microzonation, seismic characteristics of grounds has been studied. The results of analysis of macroseismic data as well as theoretical studies of earthquake faults were applied for determination of probabilistic seismic hazard estimates and general seismic zoning. A review of immediate unsolved problems of Kamchatkan engineering seismology is given.

Введение

Региональные сейсмологические исследования начались на Камчатке с 1961 года. С тех пор определенная часть усилий камчатских сейсмологов была направлена на изучение инженерной сейсмологии, то есть тех аспектов сейсмологии, которые непосредственно связаны с оценкой характера воздействия землетрясения на построенные человеком здания и сооружения, на обеспечение безопасности от угрозы землетрясения. При взгляде на результаты таких исследований в течение более 40 лет нужно

иметь в виду, что мировая инженерная сейсмология в течение этих лет активно развивалась. По мере этого развития, в разные годы, разные задачи выходили на первый план. Так, в 60-ые годы наибольший акцент делался на: (1) исследования связей макросейсмической интенсивности (балльности) с магнитудой землетрясения и расстоянием от очага; (2) изучение влияния грунтовых условий на сейсмические колебания; (3) определение стандартной формы для спектров реакции (типовые β – графики); и (4) исследование пиковых ускорений и связи пикового ускорения с балльностью.

В 70-е годы и в начале 80-х главными направлениям были: (1) сбор и первичный анализ записей сильных движений - акселерограмм, получаемых на уже развернутых в то время акселерографических сетях; (2) обобщение свойств записей, построение региональных зависимостей спектров Фурье и спектров реакции от расстояния, магнитуды и типовых грунтовых условий; (3) исследования параметров длительности колебаний и (4) синтез модельных расчетных акселерограмм на чисто эмпирической основе. Задачи предыдущего этапа тоже сохраняли интерес. В 90-е годы и по настоящее время наибольший интерес вызывают такие направления как: (1) исследования нелинейного поведения нескальных грунтов при больших амплитудах; (2) синтез модельных акселерограмм на основе описания свойств очага землетрясения и среды; (3) детальный анализ влияния строения среды (долин, осадочных бассейнов, рельефа) на параметры колебаний; (4) закономерности колебаний грунта в непосредственной окрестности сейсмогенного разлома.

Камчатские наблюдательные сети составляют очень небольшую часть мировой системы наблюдений, а камчатские сейсмологи - очень малая доля мирового сообщества сейсмологов. Их работа в области инженерной сейсмологии (в сравнении, например, с предсказанием землетрясений), всегда шла в условиях малого интереса и слабой технической и финансовой поддержки со стороны государства. Поэтому исследования по перечисленным направлениям велись выборочно, в ограниченных масштабах и с большим отставанием. Тем не менее, были изучены важнейшие, принципиальные вопросы инженерной сейсмологии Камчатки. Можно даже сказать, что и на европейском, и тем более на советско-российском фоне, камчатские результаты являются неплохо продвинутыми. В частности, были созданы акселерографические сети, на которых получен определенный объем записей, созданы средства обработки записей, архив, построены типовые региональные спектры Фурье. Изучены закономерности убывания балльности с расстоянием, начато изучение характера затухания амплитуд колебаний. Определенные результаты получены по свойствам грунтов и в области изучения влияния свойств реальных очагов на акселерограммы.

К работам по инженерной сейсмологии примыкают работы по сейсмическому районированию и вероятностной оценке сейсмической опасности, то есть по оценке повторяемости землетрясений разной силы (или, что то же самое, сотрясаемости). На Камчатке первый цикл таких работ в терминах макросейсмической интенсивности («балльности») был проведен С.А. Федотовым и Л.С. Шумиловой с использованием расчета сотрясаемости по Ю.В. Ризниченко; результаты были включены в карту общего сейсмического районирования СР-78 и далее в строительные нормы СНИП 2-II-81. Второй цикл подобных работ (в соответствии с техническим заданием Госстроя снова в терминах балльности) был проведен в 90-е годы под руководством и по алгоритмам А.А.Гусева с участием Л.С.Шумиловой и В.М.Павлова; его результатом была карта общего сейсмического районирования России ОСР-97, вошедшая в строительные нормы 2000 г. Параллельно был создан региональный участок мировой карты сейсмической опасности по проекту ЮНЕСКО «GSHAP» (Глобальная программа сейсмической опасности) в терминах максимального ускорения. Для города Петропавловска-Камчатского также выполнялась вероятностная оценка сейсмической опасности в терминах амплитуд ускорения.

В течение более 40 лет инженерно-сейсмологические исследования проводили разные группы ученых. С 1961 по 1972 г. исследования шли в основном под флагом лаборатории инженерной сейсмологии и Тихоокеанской сейсмической экспедиции ИФЗ АН СССР под руководством В.В. Штейнберга и С.А. Федотова. За развитие сети наблюдений отвечали О.Ф. Шайдуллин и К.Е. Чепкунас; существенную роль в накоплении записей сильных движений сыграл также коллектив сейсмической станции «Петропавловск» под руководством Л.Г. Синельниковой. С 1972 года эти работы велись в основном под эгидой лаборатории сейсмометрии Института вулканологии ДВО АН СССР под руководством В.Д. Феофилактова, а с 1978 года под эгидой Камчатской сейсмологической партии ГС АН РАН под руководством Е.И. Гордеева и В.Н. Чеброва. Накопление данных проводилось также в рамках КОМСП. Основными исполнителями по сети наблюдений, накоплению данных и созданию архива были В.П. Митякин, В.Н. Козлов, А.Г. Петухин, Н.П. Воропаева. Анализом данных занимались: в 70-е годы С.А. Федотов, Л.С. Шумилина и В.В. Штейнберг, в 80-е годы А.А. Гусев, Е.М. Гусева, 90-е годы А.А. Гусев, А.Г. Петухин, Е.М. Гусева. Математическое обеспечение работ по инженерной сейсмологии и сейсмической опасности создано А.А. Гусевым и под его руководством Е.М. Гусевой, В.М. Павловым и А.Г. Петухиным.

Изучение макросейсмических данных

Исторические макросейсмические данные по Камчатке были обобщены сначала Ф.А. Кирилловым в 1962 г. [23]; затем более полная их версия была приведена в отчете С.А. Федотова, Ф.А. Кириллова, А.А. Годзиковской 1968 г. [33]. Кроме того, при каждом сильном землетрясении на Камчатке проводился сбор и анализ макросейсмических данных, построение карт изосейст. Это было выполнено для сильных землетрясений 22.11.1969 [32], 24.11.71 [2, 9, 16], 15.12.71 [8, 10], 17.08.83 [21, 26], 28.12.84 [20], 08.06.93 [3], 05.12.97 [12, 24, 28]. К сожалению, полный каталог макросейсмических данных Камчатки до сих пор не создан ни в печатном, ни в электронном виде, но такая ситуация по России в целом. Анализ макросейсмических данных по Камчатке впервые проведен С.А. Федотовым и Л.С. Шумилиной [34] по минимальному объему исходных данных. Был построен первый вариант зависимости балл I – (гипоцентральное) расстояние r – магнитуда. Важнейший результат этой работы – установление того факта, что принимаемая обычно за стандарт в СССР макросейсмическая формула Блейка-Шебалина не пригодна для условий Камчатки и Курил. Была с успехом использована формула Кевеслигети-Шебалина. Результат имеет вид:

$$I = 1,5M_{LH} - 2,63 \lg r - 0,0087r + 2,5 \quad (1)$$

Эта формула была затем использована для первого расчета сотрясаемости Камчатки и составления карты СР-78. Позднее этот результат был подправлен Л.С. Шумилиной [17]: было обнаружено, что (1) завышает интенсивность примерно на 0,8 балла при фиксированных магнитуде и расстоянии. А.А. Гусев и Л.С. Шумилина [17] дали уточненную зависимость балл-расстояние-магнитуда. Зависимость нелинейная, выражена в шкале моментных магнитуд и дает аккуратное, теоретически обоснованное описание насыщения балльности вблизи протяженного очага. Эти результаты были положены в основу расчетов карты ОСР-97.

Стационарная система наблюдения за сильными движениями , первичная обработка и архивизация наблюдений

Создание сети сильных движений на Камчатке началась с установки приборов УАР на сейсмической станции Петропавловск в 1962 году, затем на с/ст. Беринг в 1964 г. и на с/ст. Крутоберегово в 1968 г. Акселерографы УАР были рассчитаны на

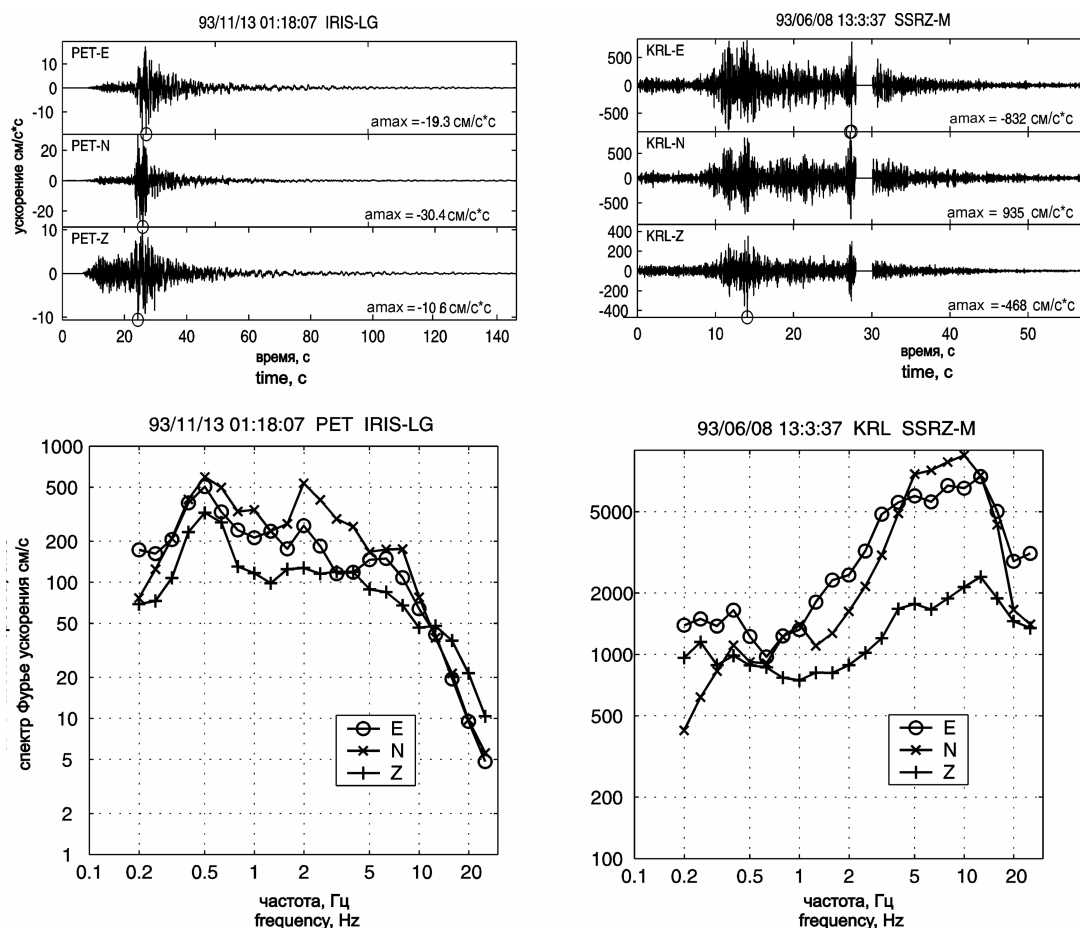


Рис. 1. Слева - запись землетрясения 13.11.1993 г. ($M=7$) на с/ст. «Петропавловск» (расстояние 180 км) акселерографическим каналом цифровой широкополосной сейсмической станции IRIS (вверху) и ее спектр Фурье (внизу). Справа - запись землетрясения 08.06.93 г. ($M=7,5$) на с/ст «Круглый» (расстояние 70 км) акселерографом ССРЗ-М и ее спектр Фурье. Видно, что очаг создал несколько всплесков излучения с суммарной длительностью до 20 с. Разрыв на записи – дефект регистрации. Рекордное значение ускорения, близкое к $1g$, связано с весьма необычными грунтовыми условиями под ст. «Круглый». Они проявляются в виде мощного аномального максимума в спектре Фурье в диапазоне 3-20 Гц.

Fig.1. Example records and spectra. On the left: event 1993.11.13. ($M=7$, $D=180$ km) recorded by the accelerometric channel of the broadband digital station PET (top) and its instrument-corrected Fourier spectrum (bottom). On the right: event 1993.06.08 г. ($M=7,5$, $D=70$ km) photo-recorded by SSR-Z accelerograph at the station Kruglyy and its spectrum. One can see several radiation bursts related to source propagation that lasted about 20 s. The gap on the record is due to a recorder fault. A record peak acceleration of about $1g$ is caused by rather unusual geology under Kruglyy instrument. Its imprint is a powerful anomalous hump in Fourier spectrum in the frequency band 3-20 Hz.

землетрясения силой до 9 баллов и не могли записывать землетрясения средней силы - 3-5 баллов. Для их регистрации еще в 1960-е годы была начата расстановка велосиграфов ИСО. Приборы УАР были достаточно примитивными, имели регистрацию записи на фотобумаге. Уже с конца 60-х годов они стали заменяться на пленочные приборы ССРЗ и позднее АСЗ. Эти акселерографы до сих пор составляют основу систем регистрации сильных колебаний грунта на Камчатке. В момент наибольшего развития было установлено около 25 станций сильных движений с аналоговой фоторегистратией. С конца 80-х годов система наблюдений постепенно деградирует, так как установленные приборы давно выработали ресурс, а новые приборы не

поступали и не могли закупаться. Важный, хотя и локальный позитивный факт — установка на сейсмической станции «Петропавловск» цифрового акселерографа как подсистемы широкополосной цифровой станции «Квантерра» сети IRIS.

Архив акселерограмм стал формироваться начиная с 60-х годов. Материалы наблюдений вместе с материалами калибровки аппаратуры накапливались и в последние 20 лет постепенно переводились в цифровой вид. Существенная часть записей оцифрована. Оцифровка проводилась сначала с помощью известного прибора Ф004, а в последнее время, путем автоматической обработки сканированных фотопленок с помощью программы, составленной Д.В. Дрозным. Первичная обработка сейсмограмм заключалась в снятии неисправленных за прибор значений максимальных ускорений на акселерограммах и максимальных скоростей на велосиграмах. Затем выполнялась коррекция сдвига и поворота нулевой линии, коррекция за амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазово-частотную характеристику (ФЧХ) прибора (в частотной области) и расчет таких характеристик акселерограммы, как спектры Фурье и спектры реакций. Все это делалось с помощью собственного программного обеспечения [18]. Материалы наблюдений отдельных землетрясений были частично опубликованы: по событиям 1969 г. [32], 1971 г. [38], 1983 г. [26], 1996 г. [25], 1997 г. [24, 28].

Оцифрованные записи составили цифровой архив. Начата организация банка данных. В настоящее время в архиве имеются 552 трехкомпонентные акселерограммы. Из них, 2 записи приблизительно соответствуют 7-8 баллам и 5- соответствуют 6-7 баллам. На рис 1 для иллюстрации даны записи землетрясений 08.06.93 года на с/ст Круглый, запись получена на приборе ССРЗ-М; и записи землетрясения 13.11.93 года на с/ст «Петропавловск», полученной с IRIS-LG. Также приведены спектры Фурье обеих записей.

Обобщение наблюдений сильных движений

Общий тон в области обобщения наблюдений сильных движений был задан работами в Калифорнии, где к середине 70-х годов был накоплен архив в сотни записей от десятков землетрясений. В этих условиях обобщение материалов можно было делать непосредственно по общему методу множественной регрессии, когда одновременно разыскиваются все основные зависимости сейсмических амплитуд - от расстояния, от магнитуды и от типа грунта. На Камчатке объем наблюдений до сих пор совершенно недостаточен для подобного подхода. Поэтому для обобщения наблюдений сильных движений была разработана специальная методика последовательного анализа [15]. Нестандартный элемент методики в том, что предварительно выполняется расчет кривых затухания с расстоянием для изучаемого параметра. В качестве такого параметра может служить, например, максимальное ускорение, уровень амплитудного спектра Фурье на определенной частоте, и т.п. Расчет названных кривых ведется по упрощенной модели, с использованием характеристик затухания волн, полученных по слабым землетрясениям. Важное свойство модели — учет в первом приближении эффектов протяженности очага. Алгоритмы и программное обеспечение для реализации полуэмпирической модели затухания параметров колебаний детально описаны [14, 15].

На рис. 2 приводится блок-схема алгоритма полуэмпирического расчета параметров колебаний грунта. Дадим краткие пояснения для случая расчета максимальных ускорений. Сначала по полуэмпирической модели очагового спектра Фурье рассчитываем модуль спектра Фурье акселерограммы, с учетом (1) расхождения и (2) затухания волн от точечного источника, а также (3) теоретической модели насыщения амплитуд вблизи протяженного источника. Затем определяем длительность колебаний по теоретической модели с учетом вкладов очага и распространения в среде. Далее на основе равенства Парсеваля оцениваем среднеквадратическую амплитуду, а по ней, с учетом ожидаемого пик фактора, максимальную амплитуду.

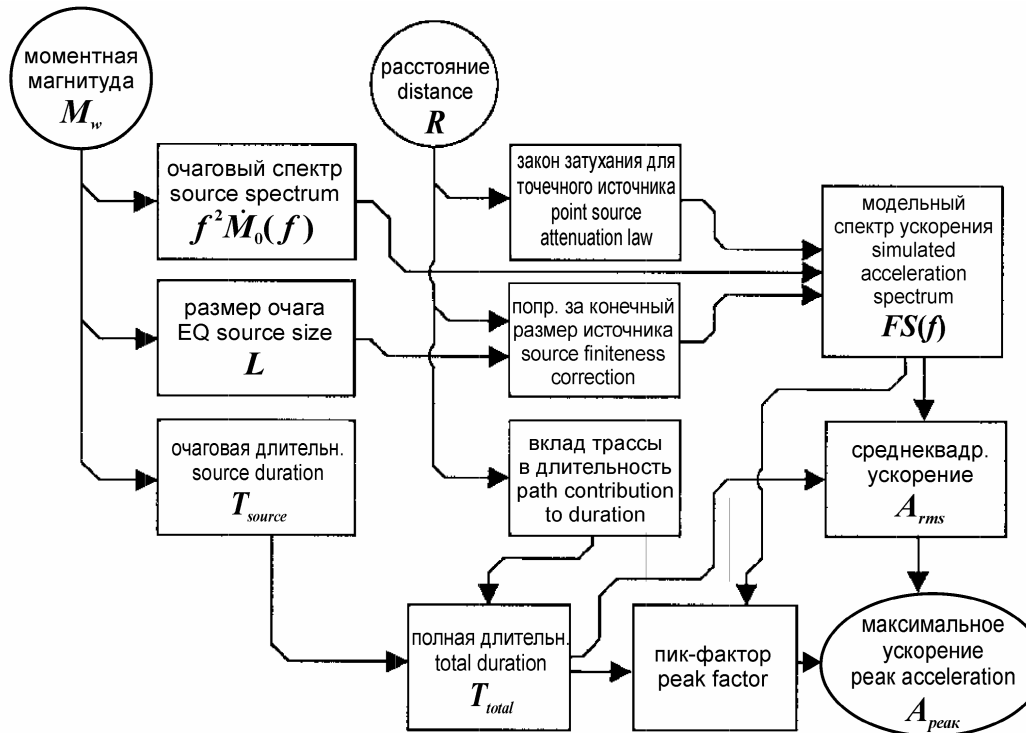


Рис. 2. Блок-схема алгоритма теоретического расчета параметров колебаний грунта для случая максимального ускорения.

Fig. 2. A flow-chart of the algorithm for theoretical calculation of the parameters of strong ground motion; the particular version is for peak acceleration.

При анализе наблюдательных данных на первом этапе амплитудные параметры, полученные на разных расстояниях от очагов, с помощью заранее рассчитанных кривых затухания приводятся к фиксированному расстоянию, например, 100 км. Когда подобное приведение выполнено, на втором этапе, изучается зависимость параметра от магнитуды, типа грунта и/или особенностей регистрирующей станции. По описанной схеме был проведен анализ зарегистрированных на Камчатке максимальных ускорений и спектров Фурье [7, 40, 42]. При этом основными независимыми параметрами регрессии являлись моментная магнитуда, расстояние и тип грунта. Для примера приводим (рис. 3) кривую зависимости от магнитуды для максимального горизонтального ускорения.

Наиболее существенные результаты исследования зависимости максимальных ускорений и спектров Фурье на Камчатке от расстояния и магнитуды сводятся к следующему. При фиксированной магнитуде и расстоянии камчатские землетрясения оказались в большой степени аналогами хорошо изученных землетрясений Японии. Этот вывод согласуется с наличием близкой аналогии между камчатскими и японскими землетрясениями в отношении зависимости макросейсмической интенсивности от расстояния и магнитуды [17]. Важен также вопрос о форме кривых спектров реакции [6]. Оказывается, что они также напоминают таковую для района Японии.

Таким образом, оказалось, что Камчатка попадает в широкий класс регионов с относительно высокими значениями максимальных ускорений, наряду с такими районами как Италия, Иран, Греция (и Европа в целом). Только на востоке Северной Америки и в Восточных Гималаях амплитуды еще выше. Важно отметить, что типичные максимальные ускорения на Камчатке заметно выше, чем максимальные ускорения для региона «Запад США» (в первую очередь, Калифорния). Иные здесь и формы спектров Фурье и спектров реакции (β -графики).

Структурные отличия Калифорнии и Камчатки очевидны, так что различия в амплитудах не являются неожиданностью. Труднее понять, почему камчатские (и япон-

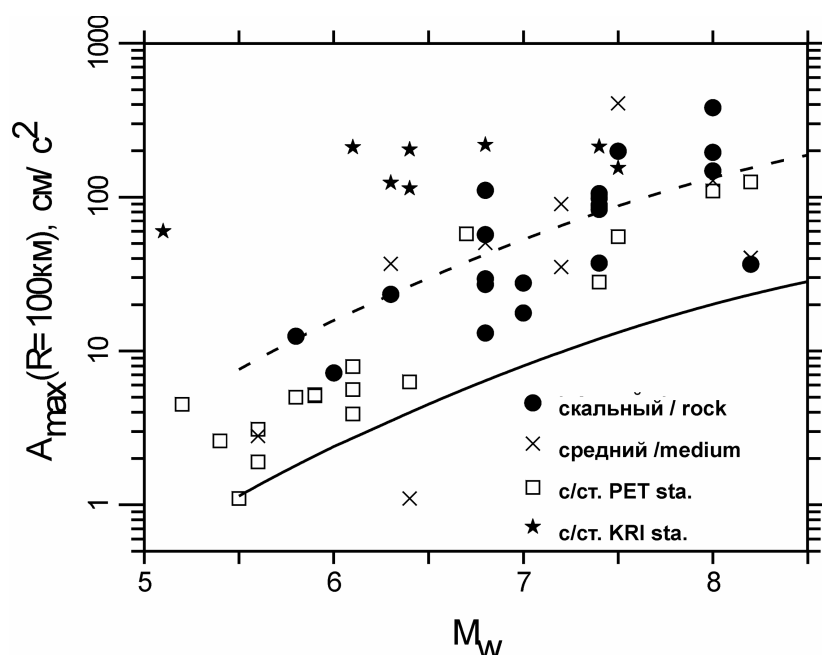


Рис. 3. Приведенные к 100 км наблюдаемые на Камчатке горизонтальные ускорения грунта в зависимости от магнитуды.

Наблюдаются сильное влияние конкретных станций и, в малой степени, типа грунта. Средняя тенденция (штриховая линия) получена при исключении этих эффектов. Сплошная линия - средняя кривая для условий Калифорнии.

Fig. 3. The values of horizontal peak acceleration recorded on Kamchatka and reduced to a fixed distance of 100 km, versus magnitude.

Note powerful station effects and weak ground type effects. Average trend (dashes) was obtained with excluded station and ground-type terms, using multiple regression with dummy variables. Solid line is the average trend for California.

ские) ускорения заметно выше, чем типичные ускорения для (относительно мало изученной) территории Алеутской дуги и Южной Аляски. В плане уровня амплитуд максимальных ускорений субдукционные землетрясения Аляски и Алеут (а также, по-видимому, Мексики) скорее аналогичны землетрясениям в районе разлома Сан-Андреас и зоны Бассейнов и Хребтов на Западе США. Таким образом, можно подозревать, что на стыке Камчатской и Алеутской дуг, возникает некое загадочное сочленение зон с разной тонкой структурой очагов землетрясений.

В целом, оказалось, что землетрясения на Камчатке не обладают ярко выраженной региональной спецификой. Установление этого факта весьма важно. Ясно также, что наиболее детально изученные землетрясения Западе США и менее изученные землетрясения Аляски и Алеут не должны применяться как прямые аналоги при расчетах на сейсмостойкость камчатских зданий и сооружений. При необходимости для этого целесообразно привлекать записи землетрясений Японии, Чили, Перу и других подобных островных дуг.

Была также выявлена выраженная зависимость уровня колебаний на определенных частотах от конкретной станции. Размах амплитуд на разных станциях достигает на некоторых частотах до 10 раз (при том же расстоянии и магнитуде), что аномально много. Хотя наличие выраженных станционных вариаций, несомненно, численные оценки требуют проверки и уточнения, поскольку результаты могут быть искажены за счет неоднородности характеристик колебаний в пределах региона Камчатки (причем, возможна и неоднородность свойств очагов, и неоднородность характеристик затухания).

Определенные результаты были получены в плане исследования длительности колебаний грунта. Что касается компонента длительности, определяемого трассой

распространения колебаний, то он был относительно детально изучен А.Г. Петухиным и А.А. Гусевым [42] по данным с/ст. «Петропавловск» для набора частотных полос, там же были построены типовые огибающие колебаний. Для сильнейших землетрясений данных об очаговых компонентах длительности по Камчатке совершенно недостаточно для надежных выводов. Поэтому было проведено обобщение оценок длительности (а также размера очага) по мировой сводке данных [13]. Влияние индивидуальных особенностей станции на длительность отмечено в [11]. Установлено, что для приемников на нескальных грунтах длительность обычно выше, чем на скальных, детально вопрос не изучался. Для корректного комбинирования вкладов источника, трассы и приемника была предложена простая теория, основанная на идее свертки огибающих (временного хода средних квадратов амплитуд) сигналов-компонент [4, 40, 42], теория реализована в алгоритме [14].

Изучение эффектов грунта и сейсмическое микрорайонирование

Изучение сейсмических свойств грунтов (сейсмическое микрорайонирование, СМР) на Камчатке начато работами В.В. Штейнберга в 60-е годы [37]. Эти работы проводились на основе записей неощутимых, но относительно сильных землетрясений в избранных точках города Петропавловска-Камчатского. Были получены десятки записей на характерных (типовых) грунтах. Сопоставление их спектров позволило охарактеризовать ожидаемые формы спектров Фурье и спектров реакции на разных типах грунтов Петропавловска-Камчатского. Этот подход дальнейшего развития не имел, так как в нем крайне трудно разделить эффекты очага, трассы и грунта/станции.

Дальнейшие исследования проводились, в первую очередь, путем изучения спектральных грунтовых поправок, а не собственно форм спектра. Сравнивались записи одного и того же землетрясения на ряде станций, что позволяло изолировать эффект грунта. Работы такого рода, в основном, проводились в связи с СМР конкретных объектов. Это площадки под планировавшуюся атомную электростанцию [11], под Мутновскую ГеоТЭС (1984-1986 г.) и еще на ряде объектов после 1985 года. В этих работах были получены оценки спектральных характеристик грунтовых толщ относительно скального грунта для ряда грунтов. Это позволило накопить опыт СМР и получать достаточно надежные результаты. В основном, использовались прямые S- волны, но для работ, выполняемых в условиях ограниченного времени, привлекались также отношения амплитуд кода волн.

Изучение эффектов грунта на Камчатке до сих пор проводилось только по слабым землетрясениям, поэтому влияние амплитуд колебаний на свойства грунтовых толщ (эффект нелинейности) в условиях Камчатки совершенно не изучено. Поскольку данный вопрос чрезвычайно важен для оценки амплитуд возможных сильных (8-9 баллов) землетрясений на нескальных грунтах, при оценке параметров колебаний таких грунтов в [6] эффекты нелинейности были в грубом приближении учтены на основе результатов работ японских исследователей. Исследования нелинейного поведения камчатских грунтов – важная задача на будущее.

Вероятностные оценки сейсмической опасности и сейсмическое районирование

Первая работа по вероятностной оценке сейсмической опасности (сотрясаемости) Камчатки была проведена С.А. Федотовым и Л.С. Шумиловой [34, 35] по методике расчета сотрясаемости Ю.В. Ризниченко. Эта работа опиралась на исходные данные по статистике сейсмичности в терминах магнитуды M_{LH} и на представление очагов землетрясений в виде точек. Хотя сегодня такое представление может выглядеть примитивным, для того периода времени использованная методика была, безусловно, передовой. Результатом были карты сотрясаемости, которые легли в основу карты сейсмического районирования ОСР-78 [36], которая в свою очередь вошла в состав строительных норм и правил СНИП-II-81.

Поскольку наиболее опасные камчатские землетрясения имеют большую протяженность очагов (до 500 км), то, конечно, модель точечного источника является достаточно грубым приближением. В условиях Запада США обычно приемлема и часто применяется в других регионах методика учета протяженности очага на основе модели линейного излучателя. Однако, для важнейшего для Камчатки случая субдукционного землетрясения с магнитудой 8-9 адекватная методика источника учета протяженности должна исходить из модели двумерной площадки-излучателя; без этого корректный расчет невозможен. Соответствующая методика была разработана А.А. Гусевым на основе теории [4, 17] и реализована В.М. Павловым при участии А.Г. Петухина. Ее первый вариант был опробован в работе по сейсмическому районированию Корякского автономного округа, а затем развитый далее вариант методики, был использован в расчете карт ОСР-97 и мировой карты сейсмической опасности GSHAP [29, 30, 31, 43, 44].

В 1972-1974 гг. были проведены работы по детальному сейсмическому районированию на район Петропавловска-Камчатского, при этом впервые были приняты во внимание сейсмогеологические критерии сейсмоопасности. [22]

Расчеты вероятностной сейсмической опасности дают оценку повторяемости сотрясений в каждом конкретном участке территории (расчеты для общего сейсмического районирования, ОСР выполнялись по сетке размером 25×25 километров). Но для ряда целей нужны детерминистические оценки опасности от конкретных вариантов возможных событий. Дело в том, что для инженерных сетей, дорог, ЛЭП ущерб может иметь место по обширной территории одновременно. Описать его и обеспечить расчеты живучести на основе оценок опасности в отдельных точках (типа обычной карты ОСР) принципиально невозможно. По тем же причинам оценки опасности от конкретных событий (детерминистические) необходимы для подготовки к возможному стихийному бедствию, для оценки масштаба ущерба и экономического риска и для планирования контрмер. Прогнозные оценки для землетрясений, угрожающих Петропавловску-Камчатскому, были проведены в виде расчетов прогнозных карт изосейст, (то есть, в терминах балльности) для шести вариантов «сценарных» землетрясений (Гусев А.А., Шумилина Л.С., 2004, рукопись готовится к публикации).

Все перечисленные работы выполнялись в терминах балльности. Однако камчатский (практически, российский) участок мировой карты сейсмоопасности GSHAP был составлен в терминах максимального ускорения грунта [45]. В этом случае все основные расчеты проводились в терминах балльности, но на заключительном этапе находили максимальные ускорения A путем пересчета из балла I по корреляционной формуле:

$$\lg A = 0,333I - 3,21387 \quad [g] \quad (2)$$

Полученные таким путем величины – это по существу, так называемые, эффективные максимальные ускорения. Использование значений эффективного максимального ускорения в инженерных расчетах весьма целесообразно, так как оно лучше характеризует реальную сейсмическую опасность, чем максимальное ускорение, непосредственно снятое с акселерограмм. Причина выигрыша в том, что в значениях эффективных максимальных ускорений неявно учтен фактор длительности колебаний, роль которого в развитии разрушения зданий может быть упущена при обычном расчете спектральным методом.

Нельзя не отметить, что формула (2) заметно отличается от принятого в действующем СНиП соотношения $\lg A = 0,30103 I - 3,10721 g$. Если согласно СНиП, при $I = 7,8$ и 9 баллов имеем $A = 0,1; 0,2$ и $0,4 g$; то по (2) имеем, соответственно, $0,131; 0,282$ и $0,607 g$. Таким образом, при 7 и 9 баллах карта сейсмоопасности GSHAP прогнозирует нагрузки на 30% и 50% выше, чем принятые в СНиП. Еще дальше идет Гусев А.А. [5]. На

основе предварительного изучения материалов макросейсмических и инструментальных наблюдений на Камчатке (и в согласии с зарубежными работами) он полагает, что занижение нагрузок для заданного балла в действующем СНИП – двукратное. Это – результат для среднего грунта. Для скального грунта и небольших сооружений занижение нагрузок в строительных нормах 2000 г., относительно реальности, может достигать четырех раз. В целом, вполне вероятно появление в будущем для теперешней 9-балльной зоны уровня максимальных ускорений 0,65-0,80 g.

Важнейшие нерешенные задачи

1. *Обеспечение наблюдений фактических сильных колебаний грунта.* Одной из главных задач наблюдательной сейсмологии на Камчатке является резкое увеличение надежности и плотности сети приборов сильных движений. На сегодня приборы выработали свой ресурс, их работа поддерживается с большим трудом и не обеспечивается надежность записи. В результате, по каждому очередному сильному землетрясению получают, в лучшем случае, 2-3 записи, что до обидного мало, если учесть, что каждом сильном землетрясении в Японии, на Тайване и США и даже в Иране, Турции или Мексике получают десятки и сотни записей. Но хотя число записей – важный вопрос, наиболее острой, первоочередной задачей является обеспечение надежной регистрации сильных землетрясений хотя бы в ограниченном числе пунктов. Приборы сильных движений должны быть цифровыми. Было бы очень неплохо учесть японский опыт, где приборы сильных движений параллельно решают задачу и накопления данных о колебании грунта, и задачу информирования властей о характере колебаний грунта, включая оперативную оценку вероятной интенсивности (балла).

2. *Изучение закономерностей затухания сейсмических волн* вдоль пути их распространения от очага. До сих пор во всех прогнозных расчетах принималось, что затухание зависит только от гипоцентрального расстояния и не зависит ни от направления, ни от положения источника и приемника. На самом же деле, как хорошо известно из карт изосейст, затухание вдоль основной фокальной зоны (направление северо-северо-восток) и поперек нее сильно отличаются. Распространение колебаний вдоль фокальной зоны идет с меньшими потерями и изосейсты всегда вытянуты вдоль нее (этот факт не связан с эффектами протяженного очага). Простейшее объяснение подобной формы изосейст – через анизотропию затухания. Именно эту гипотезу развивают ученые Греции и Италии. С другой стороны, подобные же аномалии поглощения в Японии, по-видимому, неплохо объясняются через резко неоднородную структуру параметра Q . В целом, данный вопрос представляет собой большую неизученную область. Наиболее реальные шансы подойти к решению данной проблемы - с помощью изучения амплитуд колебаний от землетрясений средней силы. Наряду с затуханием, необходимо продолжить изучение характеристик длительности колебаний, без чего затруднен синтез модельных акселерограмм на эмпирической основе

3. *Исследование сейсмической опасности, порождаемой коровыми землетрясениями,* возникающими на суше Камчатки. Хотя такие землетрясения по числу относительно невелики (в плане коровой сейсмичности Камчатка сопоставима с Кавказом), их очаги могут располагаться непосредственно вблизи от населенных пунктов, дорог и других сооружений на Камчатке. Поэтому они вносят существенный вклад в общую сейсмическую опасность Камчатки. И если вблизи восточного побережья их роль относительно невелика, с удалением от Тихого океана, в долине р. Камчатка, в районе Срединного хребта их роль становится доминирующей. Главные проблемы здесь в том, что плохо понятно, на каких конкретно разломах могут формироваться очаги таких землетрясений, какие у них предельные магнитуды, какова их повторяемость и насколько велика роль «слепых», не выходящих на поверхность сейсмоактивных разломов. Это большая тема для дальнейших исследований, которые должны идти не

только методами сейсмологии, но и, в большой степени, методами палеосейсмологии и сейсмогеологии.

4. *Освоение методик прогноза колебаний грунта на основе синтеза модельных акселерограмм.* Именно такого рода исходные данные требуются сегодня для решения любых сколько-нибудь серьезные задач по расчету нетиповых зданий и сооружений на сейсмостойкость. Здесь три основных направления: (1) создание методик расчета акселерограмм для условий скального грунта с учетом пространственно-временной структуры очага землетрясения в широкой полосе частот и распространения волн в Земле в рамках модели слоистой среды; (2) изучение специфики распространения волн вблизи площадки (эффекты долин, рельефа, подземного рельефа и проч.); (3) изучение нелинейных эффектов в грунтах, вплоть до псевдооживления, без чего невозможен правдоподобный расчет колебаний для условий нескального грунта.

5. *Изучение специфических свойств очагов землетрясений Камчатки и вариаций таких свойств в пределах региона.* При фиксированной магнитуде и расстоянии и при конкретном типе грунта действие волн на сооружение зависит от свойств очага. Сегодня у нас есть основания полагать, что очаги землетрясений разных мест - в районе Петропавловска - Камчатского и в районе Усть- Камчатска; вблизи побережья и вблизи глубоководного желоба - могут заметно отличаться по своим спектральным свойствам и по амплитудам. Наконец, имеет место зависимость свойств очагов от глубины, изучение которой уже начато. При фиксированной магнитуде и гипоцентральной расстоянии рост глубины явно ведет к увеличению амплитуд колебаний, но масштабы этого явления пока не ясны.

6. *Изучение зависимости между описанием колебаний на языке макросейсмической интенсивности в баллах и на языке амплитуд.* Проблема здесь в том, что в рамках существующих (имеющих характер закона) строительных норм и правил (СНиП), такая зависимость зафиксирована и эта зависимость, по-видимому, сильно отличается от реальной для землетрясений Камчатки и других регионов. Последние исследования [6] показали, что в условиях колебаний в 7 баллов по макросейсмическим данным, амплитудный уровень колебаний (максимальное ускорение) для землетрясений Камчатки, по-видимому, составляет около 0,20 g, в то время как в СНиП принят уровень колебаний 0,10 g. Это означает, что при том же самом балле реалистический уровень амплитуд колебаний и нагрузок на здание приблизительно вдвое больше, чем согласно СНиП. Данные эти требуют дальнейшего изучения и, если подобное явление будет доказано, встанет вопрос о соответствующей корректировке СНиП, или в принятии территориальных строительных норм (ТСН).

7. *Составление региональных β -графиков.* β -график – это одна из характеристик колебаний грунта, необходимая для массового инженерного расчета по методу спектров реакции. В этом методе, как известно, динамическое воздействие от землетрясения заменяется на статическую силу и этот переход производится как раз на основе β -графика (нормированного спектра реакции). Сегодня камчатские строители пользуются стандартными типовыми β -графиками, которые заложены в СНиП. Эти формы спектров во многом не подходят для условий Камчатки; требуется разработка регионального варианта β -графиков.

8. *Изучение вероятностной сейсмической опасности Камчатки в терминах амплитудных параметров.* Эта тема затронута в [6], но эта работа устарела. Пока Россия сохраняет на карте ОСР балльность, данный вопрос не имеет острого характера. Но он неизбежно встанет как для задач ОСР, так и для задач детального сейсмического районирования - ДСР, и разработка его назрела. Хотя определенный задел имеется, многое в данном вопросе неясно. Одна их самых серьезных проблем – убедительное согласование оценок в терминах баллов и ускорений. Выше отмечено (п. 6), что до решения этой проблемы пока далеко.

Заключение

В итоге более 40 лет исследований в области инженерной сейсмологии на Камчатке представления о сейсмической опасности существенно изменились, и уровень понимания этой опасности улучшился радикально. Достаточно сказать, что расчетное землетрясение для Петропавловска-Камчатского в 50-е годы и начале 60-х годов принималось в 8 баллов по макросейсмической шкале. В 1969 г расчетная балльность была поднята до 9 баллов. Сейчас некоторые сейсмологи предлагают поднять принятую в настоящее время (2004 г) расчетную балльность для $T=500$ лет с 9 до 10 баллов, что, по мнению авторов, пока мало обоснованно. Иной вопрос, что означают эти баллы в терминах амплитуд колебаний. Выше отмечено, что корректные вероятностные оценки расчетного ускорения для восточного побережья Камчатки пока не выработаны. Но едва ли оценки для теперешней 9-балльной зоны для $T=500$ лет будут существенно ниже 0,70 g, что существенно выше принятого в настоящее время значения 0,40 g.

Существенно изменилась за 40 лет и конфигурация зон на карте ОСР. В первую очередь это касается Усть-Камчатска, берингоморского побережья и материковой части Камчатской области (ныне-Корякская АО), опасность которых ранее существенно недооценивалась. Надежно установлена средняя зависимость балл-расстояние-магнитуда для Камчатки. Таково положение в отношении изучения балльности и общего амплитудного уровня колебаний.

Что же касается спектральной и амплитудной характеристики колебаний, то в 60-е годы эта задача даже не была ясно поставлена. А к настоящему времени по материалам собственных наблюдений построены средние зависимости максимальное ускорение-расстояние-магнитуда, спектр Фурье-расстояние-магнитуда, и максимальное ускорение-расстояние-магнитуда. Получены ориентировочные оценки параметров длительности колебаний. Начата и продвигается работа по установлению связей спектр реакции - расстояние-магнитуда, максимальная скорость-расстояние-магнитуда, создается основа для построения региональных β -графиков.

Таким образом, усилия исследователей, которые проводили регистрацию сильных колебаний грунта, анализировали результаты этих наблюдений, изучали свойства очагов и среды, а также пространственную структуру сейсмичности, привели к большой прогрессу в понимании характера сейсмической опасности Камчатки. Конечно, при этом приходится признать, что по сравнению с другими зонами высокой сейсмической опасности, такими как Япония, США, степень изученности опасности камчатских землетрясений недостаточна. Предстоит еще многое сделать для того, чтобы передавать инженерам вполне надежные характеристики потенциально разрушительных колебаний грунта.

Список литературы

1. Аптикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта. Исследования по сейсмической опасности. // Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука.1988. Вып. 29, с.98-107
2. Баранников Л.Б., Борисова Н.С., Ершов И.А., Константинова Т.Г., Медведев С.В., Федотов С.А., Федякова С.Н., Штейнберг В.В., Шумилина Л.С., Макросейсмическое обследование последствий землетрясения 24 (25) ноября 1971 г. на территории г. Петропавловска-Камчатского. // Сильные Камчатские землетрясения 1971 года. Владивосток. 1975, с.15-62
3. Гордеев Е.И., Левина В.И., Чебров В.Н., Иванова Е.И., Шевченко Ю.В., Степанов В.В. Землетрясения Камчатки и Командорских островов. // Землетрясения Северной Евразии в 1993 году. М.: НИИ-Природа.1999, с.102- 114.

4. Гусев А.А. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясения и ее применение к оценке короткопериодного сильного движения // Вулканология и сейсмология. 1984. №1, с.3-22.
5. Гусев А.А. О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России. // Физика Земли. 2002. №12, с.35-44
6. Гусев А.А. Предварительный вариант расчетных сейсмических нагрузок для Петропавловска-Камчатского // Вопр. инж. сейсмологии М.: Наука. 1990. Вып. 31, с.67-85.
7. Гусев А.А., Гусева Е.М., Петухин А.Г., Гордеев Е.И., Чебров В.Н. Максимальные ускорения грунта по данным приборов сильных движений на Камчатке // Физика Земли. 1998. № 4, с.20-27.
8. Гусев А.А. Зобин В.М. Макросейсмическое описание Усть-Камчатского землетрясения // Сильные Камчатские землетрясения 1971 года. Владивосток. 1975, с. 85-96.
9. Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С. Петропавловское землетрясение 24 (25).X1 // Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука. 1975. с. 163-171.
10. Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С. Усть-Камчатское землетрясение 15.X11. // Землетрясения в СССР в 1971 году М.: Наука. 1975, с.172-191.
11. Гусев А.А., Зобин В.М., Феофилактов В.Д. Определение расчетной балльности и оценка параметров максимальных колебаний грунта для площадки строительства на Камчатке // Вопросы инженерной сейсмологии М.: Наука. 1980. Вып. 2, с. 44-59.
12. Гусев А.А., Левина В.И., Салтыков В.А., Гордеев Е.И. Сильное Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года: основные данные, сейсмичность очаговой зоны, механизм очага, макросейсмический эффект. // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский, КГРФ. 1998, с. 32-54.
13. Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. №6, с. 55-63.
14. Гусев А.А., Петухин А.Г. Расчетные модели для прогнозирования параметров колебаний грунта // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН. 1995. № 2-3, с. 248-259
15. Гусев А.А., Петухин А.Г. Расчетная схема для прогнозирования параметров колебаний грунта при землетрясениях // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5, с. 182-192.
16. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Макросейсмический эффект землетрясения 24 (25) ноября 1971 г. на территории Камчатской области // Сильные Камчатские землетрясения 1971 года. Владивосток. 1975, с.81-84.
17. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999, № 4-5, с. 29-40.
18. Гусева Е.М., Гусев А.А., Оскорбин Л.С. Пакет программ для цифровой обработки сейсмических записей и его опробование на примере некоторых записей сильных движений // Вулканология и сейсмология. 1989, № 5, с. 35-49.
19. Зобин В.М., Гордеев Е.И., Бахтиаров В.Ф., Гусева Е.М., Иванова Е.И., Левин В.Е., Митякин В.П., Хаткевич Ю.М., Ходенко В.Н. Шипунское землетрясение 6 октября 1987г. // Землетрясения в СССР в 1987 году. М.: Наука. 1990, с.116-132.
20. Зобин В.М., Гордеев Е.И., Иванова Е.И., Митякин В.П. Камчатское землетрясение 28 декабря 1984 г // Землетрясения в СССР в 1984 году. М.: Наука. 1987, с. 133-143.
21. Зобин В.М., Гордеев Е.И., Козырева Н.П., Митякин В.П., Чиркова В.Н. Камчатское землетрясение 17 августа. // Землетрясения в СССР в 1983 году. М.: Наука. 1986, с.102-117.

22. Зобин В.М., Мелекесцев И.В., Шумилина Л.С. Детальное сейсмическое районирование Камчатки в области высокой сейсмовулканической активности // Детальное сейсмическое районирование М. Наука. 1980, с.89-96.
23. Кириллов Ф.А. Каталог землетрясений Курило-Камчатской зоны. (отчет ИФЗ), Москва, 1962.
24. Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М., Иванова Е.И., Левин В.Е., Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М., Гусева Е.М., Салтыков В.А., Зобин В.М. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года с $M_w=7.8$, $I_0=8$ (Камчатка).// Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. Обнинск 2003, с. 251-271.
25. Левина В.И., Иванова Е.И., Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левин В.Е., Магуськин М.А., Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Карымское землетрясение 1 января 1996 года ($M_S = 7.0$) // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. Москва. 2002, с. 129-137.
26. Митякин В.П., Молотков С.Г., Серова О.А., Алексин П.А. Камчатское землетрясение 17 августа 1983 г.// Вулканология и сейсмология. 1986. №5 с.75-89.
27. Оскорбин Л.С., Зобин В.М., Поплавская Л.Н., Рудик М.И., Щетников Н.А., Бойчук А.Н., Леонов Н.Н., Симбирева И.Г., Хантаева Т.Н., Шумилина Л.С. Землетрясение и цунами 28 февраля 1973 г // Землетрясения в СССР в 1973 году. М.: Наука. 1976. с. 200-210.
28. Петухин А.Г., Донцов О.В., Козлов В.Н., Сеницын В.И. Предварительный анализ записей сильных движений грунта Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. ($M_w=7,9$) // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. Петропавловск- Камчатский, КГРФ. 1998, с. 247-256.
29. Страхов В.Н., Уломов В.И., Шумилина Л.С. Общее сейсмическое районирование территории России и сопредельных регионов // Физика Земли. 1998, №10., с. 4-10.
30. Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование северной Евразии // Вестник ОГГГН РАН. 1999, №1(7).
31. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект новых карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмостойкое строительство. 1998. № 4, с.30 -34.
32. Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Чепкунас К.Е. Озерновское землетрясение и цунами 22 (23) ноября 1969г.// Землетрясения в СССР в 1969 году. М.: Наука. 1973, с. 195-208.
33. Федотов С.А., Кириллов Ф.А., Годзиковская А.А. Предварительный отчет о сейсмическом районировании участка строительства Кроноцкой ГЭС на Камчатке. Фонды ИФЗ АН СССР, Москва, 1968.
34. Федотов С.А., Шумилина Л.С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки // Физика Земли. 1971. № 9, с.3-15.
35. Федотов С.А., Шумилина Л.С. Уточнение сейсмического районирования Камчатки при помощи расчета сотрясаемости // Сильные Камчатские землетрясения 1971 года. Владивосток. 1975, с.97-113.
36. Федотов С.А., Шумилина Л.С., Зобин В.М., Гусев А.А. Камчатка и Командорские острова // Сейсмическое районирование территории СССР. 1980. М.: Наука с. 269-283.
37. Штейнберг В.В., Федотов С.А. Оценка параметров колебаний почвы в г. Петропавловске-Камчатском при возможном сильном землетрясении // Сейсмичность, сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск. Наука, 1974, с.90-100.
38. Штейнберг В.В., Фремд В.М., Феофилактов В.Д. Колебания грунта при сильных землетрясениях на Камчатке в 1971 г.// Сильные Камчатские землетрясения 1971 года. Владивосток.1975, с.7-14.

39. Gusev A.A. Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to short period strong motion. // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1983. V 74, pp.787-808.
40. Gusev A.A., Gordeev E.I., Guseva E.M., Petukhin A.G. and Chebrov V.M. A first version of the $A_{max}(M_w, R)$ relation for Kamchatka. // *Pure Appl. Geophys.* 1997. V.149 pp.299-312.
41. Petukhin A.G. and A.A. Gusev. The duration-distance relationship and average envelope shapes of small Kamchatka earthquakes. // *Pure appl. geophys.* 2003. V160, pp.1717 –1743.
42. Petukhin A.G., Gusev A.A., Guseva E.M., Gordeev E.I. and Chebrov V.N. Preliminary Model for Scaling of Fourier Spectra of Strong Ground Motion Recorded on Kamchatka. // *Pure Appl. Geophys.*, 1999. V.156, pp 445-468
43. Ulomov V.I. and the GSHAP Region 7 Working Group. Seismic hazard assessment of Northern Eurasia. // *The Global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999* V. 42 N6, pp.1023- 1038.
44. URL <http://www.emsd.iks.ru>
45. URL <http://www.seismo.ethz.ch/gshap/neurasia>