

На правах рукописи

Ордынская Алиса Павловна

**ОЦЕНКА МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ БАЛЛЬНОСТИ
ПО СОВОКУПНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
В ПРИРОДНОЙ СРЕДЕ И ТЕХНОСФЕРЕ**

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поиска полезных ископаемых

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте земной коры
Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических
наук
Бержинский Юрий Анатольевич
(г. Иркутск)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических
наук, профессор
Аптикаев Феликс Фуадович
(г. Москва)

доктор геолого-минералогических
наук, профессор
Дмитриев Александр Георгиевич
(г. Иркутск)

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Геологический Институт
Сибирского отделения РАН
(г. Улан-Удэ)

Защита состоится 23 ноября_ 2010 г. в 9⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 003.022.02 при Институте земной коры СО РАН,
по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского научного центра СО РАН в
здании Института земной коры СО РАН

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим
направлять по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, ученому секретарю совета,
e-mail: [**men@crust.irk.ru**](mailto:men@crust.irk.ru)

Автореферат разослан «14» октября 2010 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

Ю.В. Меньшагин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Землетрясения занимают одно из первых мест среди многочисленных природных катастроф по своим разрушительным последствиям и количеству жертв. Причиной гибели людей чаще всего является неспособность существующих зданий противостоять сейсмическим воздействиям, о чем свидетельствуют тяжелые последствия ряда сильных землетрясений. В силу этого особую актуальность приобретает оценка сейсмической опасности территорий и надёжности зданий и сооружений.

Выбор темы диссертации предопределили: а) *высокая сейсмическая активность* в области Байкальского рифта, где в последние десятилетия зарегистрирован ряд землетрясений класса $K = 13 - 15$ с магнитудами $M = 5.0 - 6.2$; б) введение в действие карт *Общего сейсмического районирования ОСП-97* [Страхов, Уломов, 1999], в результате чего остро обозначилась проблема дефицита сейсмостойкости зданий и сооружений; в) *необходимость в научно - методическом анализе* результатов обследования последствий землетрясений на территории Прибайкалья, а также экспериментальных исследований сейсмостойкости современных зданий массовой застройки, проведенных с помощью сейсмозрывных и вибрационных испытаний опытных объектов на территории Иркутской области.

При использовании сейсмических шкал одной из наиболее сложных проблем является оценка интенсивности землетрясения по совокупности неоднородных факторов. Даже в последних версиях шкал ММСК- 86 и -92 не удалось избежать искусственных приемов при оценке макросейсмического эффекта. В этом смысле целесообразно рассмотреть указанную проблему с учетом геологических эффектов в общей статистике макросейсмических признаков. Решающими здесь являются два момента: 1) необходимо привести всю макросейсмическую информацию к единообразной форме для ее дальнейшей обработки; 2) должен быть использован адекватный математический аппарат.

Выполнение первого из условий связано с базовыми понятиями шкал ММСК: *порогом чувствительности и зоной насыщения* реакции объекта. Между этими значениями реакция объекта подчиняется некоторому закону. Для зданий Н.В. Шебалиным [1975] статистически обоснован нормальный закон распределения числа зданий по степеням их повреждения, получивший убедительное подтверждение благодаря работам Т.Ж. Жунусова с коллегами [Zhunusov, 1990], И.Ф. Ципенюка [1987] и др. исследователей. Аналогичные данные имеются в отношении распределения реакции людей и предметов быта при сейсмических воздействиях [Кулиев и др., 1970]. Реакция этих видов объектов относится к статистическим данным, для которых справедлива шкала интервалов. Сложнее обстоит дело с описательными признаками (транспортные и сетевые линейные сооружения, природные явления на поверхности земли, прочие признаки), которые соответствуют шкале более низкого ранга – шкале порядка, где статистические операции не являются корректными.

Значительный разброс параметров остаточных деформаций наблюдается при попытках статистической обработки, например, обширного эмпирического материала Е.В. Поповой [1974-1980]. Недавно разработанные сейсмические шкалы «The INQUA Scale» [Michetti et al., 2004] и ее новая редакция ESI-2007 (Environmental Seismic Intensity 2007)» [Michetti et al., 2007] - предназначены специально для оценки интенсивности по различным эффектам землетрясения в природной среде. Результаты тестирования этих шкал на примере Байкальского землетрясения в 2008 году показали, что данные шкалы не могут быть отнесены даже к самому низкому рангу – шкале порядка. Приведенные факторы свидетельствуют о сложности задачи установления взаимосвязи между интенсивностью землетрясений и остаточными деформациями грунтов.

Интенсивность землетрясения, согласно Н.В. Шебалину, должна определяться всей совокупностью реакций объектов-субъектов на поверхности и самой поверхностью земли. Впервые идея количественной интерпретации макросейсмических полей и ее реализация на базе шкалы MSK-64 изложена в работе [Онофраш, Роман, 1979].

Решение задачи интегральной оценки интенсивности макросейсмического эффекта составляет ядро настоящей работы. Используемые автором информационно-статистические методы позволили: 1) представить на базе современных сейсмических шкал MMSK–92, INQUA Scale, ESI–2007 и РШСИ–2002 широкий спектр макросейсмических признаков в единообразной форме условных вероятностей, выражающей меру связи между проявлением реакции признаков и интенсивностью сейсмического воздействия; 2) получить количественные оценки сейсмической интенсивности с анализом качества этих оценок. Тестирование методики проводилось по данным инженерного анализа последствий реальных 6–8-балльных сейсмических событий на территории Прибайкалья в 1995–2008 годах.

В Иркутской области с 1989 по 2004 год проведены сейсмозрывные и вибрационные испытания полутора десятков опытных объектов жилых и общественных зданий высотой от 2 до 10 этажей, а также специальные сооружения с расчетной сейсмичностью 7-9 баллов. Вибрационные испытания двух объектов безригельного каркаса (Иркутск, 2004) были проведены с учетом накопленного автором опыта экспериментальной оценки сейсмостойкости зданий. При этом наряду с существующими методиками экспериментальной оценки сейсмостойкости зданий использовались разработанные автором методические приемы количественной интерпретации инструментальной и макросейсмической информации при сейсмических воздействиях и вибрационных испытаниях зданий.

Цель исследования:

Цель работы заключается в разработке способов количественной оценки интенсивности землетрясения на основе результатов обследования его последствий, включающих в себя, наряду с расширенным перечнем макросейсмических признаков, статистические данные об остаточных деформациях грунтов.

Задачи исследования:

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Исследовать вероятностные законы распределения макросейсмических признаков и привести неоднородную макросейсмическую информацию к единой форме условной вероятности, необходимой для количественной оценки интенсивности землетрясений.
2. Создать базу данных в форме условных вероятностей проявления различных макросейсмических признаков при сейсмических воздействиях различной интенсивности на основе современных сейсмических шкал MMSK–92, РШСИ–2002 [Шерман и др., 2003], INQUA Scale–2004 и ESI–2007.
3. Адаптировать аппарат информационных статистик к оценке сейсмических воздействий с учетом расширенного перечня проявлений землетрясения в окружающей среде, включая различные геологические эффекты.
4. Разработать информационно-статистическую систему для оценки уровня сейсмостойкости природно-технической системы «сооружение - грунтовое основание» на основе анализа ее реакции с использованием статистических методов.

Научная новизна:

1. Предложена усовершенствованная методика оценки макросейсмической балльности землетрясений на единой научно-методической основе для получения однородных статистических рядов сейсмических событий.
2. Предложены способы преобразования информации об остаточных явлениях в грунтах, соответствующей рангу шкалы порядка, к форме, допускающей статистическую обработку всего массива наблюдаемых макросейсмических признаков.
3. Для идентификации динамических моделей, используемых при оценке сейсмостойкости сооружений по результатам вибрационных испытаний, взамен алгоритмов, основанных на детерминистских подходах, впервые применены методы многомерного статистического анализа, соответствующие случайной природе сейсмического воздействия.

Практическая значимость работы:

1. Составлена информационно-статистическая база данных в виде матриц условных вероятностей реакций различных типов и видов объектов при сейсмических воздействиях на основе шкал MMSK-92, РШСИ–2002, INQUA Scale, ESI-2007, необходимая для количественной интерпретации макросейсмического поля.
2. Разработана усовершенствованная методика оценки сейсмостойкости опытных объектов типа «сооружение - грунтовое основание» по результатам их динамических испытаний.
3. Подготовлен проект Территориального стандарта региональной шкалы сейсмической интенсивности с учетом сейсмологических и инженерно-геологических особенностей Прибайкалья в целях нормативно-методического обеспечения практической деятельности по повышению сейсмобезопасности территории региона.

Защищаемые положения:

1. Закономерности распределения макросейсмических признаков в виде остаточных деформаций грунтов, повреждений зданий и других эффектов в зависимости от интенсивности землетрясений с использованием статистических данных об устойчивости грунтовой толщи при сейсмических воздействиях.
2. Интегральная оценка интенсивности землетрясений с учетом остаточных деформаций грунтов при сейсмических воздействиях в рамках расширенного перечня проявлений землетрясений в окружающей среде.
3. Информационно-статистическая система для оценки уровня сейсмостойкости природно-технических объектов по результатам их динамических испытаний.

Личное участие:

Принимала непосредственное участие в проведении инженерного обследования последствий умеренных и сильных землетрясений на территории Прибайкалья и Забайкалья в 1995, 1999, 2001 и 2008 годах; анализе макросейсмических данных современных и исторических землетрясений; тестировании проекта шкалы ESI-2007 на примере реального сейсмического события, произошедшего 27.08.2008 г. на Южном Байкале; сейсмозврывных и вибрационных испытаний опытных объектов в городах Иркутске и Ангарске в период с 1989 по 2004 год. Основная роль автора работы заключалась в расчетно-аналитической оценке сейсмостойкости объектов по результатам натуральных испытаний.

Апробация работы:

Основные результаты исследований были представлены на международной конференции во Владивостоке (1997); научно-практических конференциях при ИрГТУ в г. Иркутске (1997, 1998, 2000); российских конференциях по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию в г. Сочи (1999, 2003, 2005, 2007, 2009); на научных конференциях с международным участием при ИЗК СО РАН в г. Иркутске (2000, 2001, 2002, 2004, 2005, 2009); II Всероссийской конференции в г. Красноярске (2001); 2-м международном симпозиуме в г. Новосибирске (2005).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 12 работ.

Структура работы и объем. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа содержит (без приложений) 127 страниц, включая 17 рисунка и 28 таблиц. Список литературы насчитывает 122 наименования.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю кандидату геол.-мин. наук Ю. А. Бержинскому, докторам геол.-мин. наук, проф. С.И. Шерману, В.В. Ружичу, Т.Г. Рященко за ценные замечания и поддержку при выполнении настоящей работы, а также своим коллегам В.А. Павленову, Л.П. Бержинской, Г.Н. Масленниковой, Е.Н. Черных, Н.Н. Дреновой за помощь советом и делом.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цели и задачи исследований, обоснована актуальность работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Для количественной интерпретации макросейсмической информации обоснована необходимость ее представления в единообразной форме в виде «условных вероятностей». Окончательной целью интерпретации макросейсмического поля является вынесение суждения об интенсивности сейсмического эффекта по результатам реальных наблюдений.

В первой главе приведены основные задачи, методы, возможности и ограничения макросейсмологии как раздела инженерной сейсмологии, занимающегося изучением изменений на поверхности и в техносфере земли, возникших в результате воздействия землетрясений. Рассмотрены особенности макросейсмической информации: различная степень статистической достоверности, многоуровневая структура и разнородный характер. Приведена классификация макросейсмических признаков. Рассмотрены статистические подходы к решению проблем количественной интерпретации макросейсмического поля и изоморфизма макросейсмических и инструментальных полей.

Во второй главе рассмотрены существующие и предложенные автором, информационно-статистические методы установления взаимосвязи между реакциями макросейсмических признаков (остаточные деформации в грунтах, здания, люди и предметы быта) и интенсивностью землетрясения в форме условной вероятности $P(E/H)$, необходимой для количественной интерпретации макросейсмического поля. Условная вероятность $P(E/H)$ выражает меру реакции признака E при условии, что интенсивность землетрясения равна H .

В третьей главе изложены научно-методические основы интегральной оценки интенсивности землетрясений по совокупности неоднородных факторов, методика количественной оценки интенсивности землетрясения, реализующая байесовский подход к интерпретации макросейсмических наблюдений. Приведены примеры оценок по данной методике реальных сейсмических событий на территории Прибайкалья и Забайкалья (исторических землетрясений 1862 и 1903 годов и современных ощутимых землетрясений в 1995, 1999, 2001 и 2008 годах). Графическая интерпретация оценок интенсивности землетрясения демонстрирует высокую информативность макросейсмического поля и приемлемое с практической точки зрения качество конечных результатов.

В четвертой главе рассмотрены особенности вибрационного воздействия на природно-технические объекты. Дан краткий обзор существующих методик идентификации динамических моделей сооружений по результатам вибрационных испытаний. Изложена усовершенствованная автором методика оценки сейсмостойкости зданий по результатам вибрационных испытаний с использованием вероятностной модели инструментальной шкалы Ф.Ф. Аптикаева, методов многомерного анализа (дискриминантного и кластерного) и информационных статистик. С использованием усовершенствованной методики по результатам вибрационных испытаний оценивалась сейсмостойкость зданий: 9-этажной б/секции и 3-этажного фрагмента в конструкциях безригельного каркаса, а также 2-этажного энергоэффективного деревянного дома, возведенного по шведской технологии (Иркутск, 2004 г.)

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Первое защищаемое положение. Закономерности распределения макросейсмических признаков в виде остаточных деформаций грунтов, повреждений зданий и других эффектов в зависимости от интенсивности землетрясений с использованием статистических данных об устойчивости грунтовой толщи при сейсмических воздействиях.

Традиционно в инженерной сейсмологии рассматриваются два поля реакций объектов на сейсмические воздействия: *макросейсмическое и инструментальное*.

Инструментальное поле характеризует собственно колебательный процесс поверхности земли в пункте регистрации и его окрестности в предположении одинаковых с ним грун-

товых условий. Макросейсмическое поле представлено данными человеческой памяти, остаточными явлениями на поверхности земли, повреждениями зданий и сооружений, реакцией предметов быта и прочих объектов. Макросейсмическое поле является единственным источником информации об исторических землетрясениях.

Все макросейсмические признаки в сейсмических шкалах подразделяются на две группы: 1) *статистические признаки* – это реакции зданий, людей и предметов быта, к которым применимы статистические методы и возможно получение средних оценок и их дисперсии; 2) *описательные признаки*, к которым относятся реакции транспортных и сетевых линейных сооружений, различные эффекты землетрясения в природной среде (остаточные деформации в грунтах, изменение дебита водных источников, осыпи, камнепады, обвалы и т.д.). Объекты второй группы макросейсмических признаков представляют собой нечеткие множества, для которых применимы методы статистики объектов нечисловой природы. Существует определенная связь между сложностью системы, реагирующей на колебания грунта, и числом отчетливо различимых степеней ее реакции на эти колебания. В шкалах ММСК для наиболее простых объектов – предметов быта – выделяется минимальное число уровней - 3; для наиболее сложных - реакции людей - 7 уровней; для зданий - 6 степеней повреждений.

Оценка интенсивности землетрясения по сейсмическим шкалам носит качественный характер. Описательная часть шкал не содержит меры, позволяющей оценить информативность наблюденных данных и сравнить конечные оценки по степени их статистической достоверности и обеспеченности макросейсмическими признаками.

Проблемы интерпретации макросейсмического поля отражены в работах С.В. Медведева, Н.В. Шебалина, Ф.Ф. Аптикаева, И.А. Ершова, А.Г. Назарова, Н.И. Онофрasha, А.А. Романа, В.И. Шумилы, Н.М. Амбрайзеса, А.И. Мартемьянова, В.Г. Рассказовского, С.И. Шермана, Ю.А. Бержинского, и др.

Согласно Н.В. Шебалину [Шебалин, 2003] мера интенсивности землетрясения должна быть определена статистически, а точность ее определения зависит от объема и представительности выборки объектов, используемых для этой цели. На выбор меры оказывает влияние также и качество исходной информации о сейсмическом воздействии, которое содержит неопределенность, связанную с наличием ошибок измерения, неадекватностью наших модельных представлений о реальной геологической ситуации, элементами субъективизма в оценке макросейсмических проявлений и т.п.

Впервые статистический подход к решению проблемы интерпретации макросейсмического поля с использованием в качестве признаков степени повреждения зданий был предложен С.В. Медведевым при построении шкал ИФЗ и MSK-64. В шкале MSK-64 при статистическом переходе от относительного числа наиболее поврежденных зданий различного типа к балльности учитываются две старшие степени повреждений, составляющие чуть более 55% общего числа зданий. Макросейсмическая информация по остальным 45% зданиям (как с меньшими повреждениями, так и неповрежденными) не используется. В условиях подобной неопределенности возможны различные подходы к оценке отсутствующих вероятностей с привлечением дополнительных гипотез. Например, гипотеза о нормальном распределении по степеням повреждения зданий, вместо ограниченной статистики части объектов с максимальными степенями реакции в шкалах ИФЗ и MSK-64.

Установление взаимосвязи между фактическими деформациями в грунтах и интенсивностью землетрясения сопряжено с большими трудностями: 1) при землетрясениях высокой интенсивности эффекты в природной среде приобретают масштабы радикальных изменений дневной поверхности земли; 2) сейсмический эффект на различных грунтах при равных амплитудах колебаний в значительной степени определяется свойствами грунтов, а остаточные деформации грунтов существенно варьируют по масштабам их проявления при одинаковой балльности сейсмических событий; 3) отсутствует классификация грунтов по типам и степени их нарушенности при сейсмических воздействиях с учетом геодинамических и инженерно-геологических условий.

Первая шкала балльности по сейсмодислокациям предложена В.П. Солоненко [Солоненко, 1975]. Шкала охватывала интервал от 8 до 12 баллов (MSK-64). В.П. Солоненко отмечает, что «...такая шкала не может быть универсальной для всех сейсмических зон» и, следовательно, актуальны проблемы, связанные с разработкой региональных сейсмических шкал. В 2003 году вышла в печати монография «Региональные шкалы сейсмической интенсивности» под редакцией С.И. Шермана. Ее авторы предложили принципиально новый тип шкал – региональный, и обобщили в ней опыт создания шкалы для Прибайкалья (РШСИ-2002) с учетом сейсмологических, инженерно-геологических, природно-климатических и других условий, которые нашли отражение в указанной шкале [Шерман и др., 2003].

Сложности количественного описания остаточных явлений в грунтах привели к появлению методов экспертных оценок, которые могут характеризоваться как «полуколичественные» [Лобацкая и др., 1992, 1997; Демьянович и др., 2003]. В качестве базовых понятий использованы геодинамическая активность литосферы территории Сибири и ее сейсмический потенциал. Метод экспертных оценок является достаточно простым и оперативным способом обследования последствий землетрясения в полевых условиях.

В 1975 году Н.Н. Леоновым была составлена классификация остаточных деформаций в диапазоне интенсивности землетрясений 6-12 баллов. Классификация грунтов по сейсмическим свойствам была представлена семью типами и шестью степенями нарушенности грунтов, согласующимися с таблицей 1 СНиП-II-A.12-69*. Недостаток классификации, предложенной Н.Н. Леоновым, заключается в принятии одинакового числа - шести степеней нарушенности независимо от типов грунтов, тогда как в действительности мы имеем дело с задачей кластерного анализа второго типа. Количество кластеров для макросейсмических признаков, имеющих различную природу, заведомо не будет одинаковым. Несмотря на ряд предложений по классификации явлений на поверхности грунта, они не нашли практического применения при разработке и совершенствовании современных сейсмических шкал. Причина заключается в том, что при анализе результатов обследования последствий землетрясения не учитывалась их привязка к конкретной геолого-структурной и тектонической ситуации, влияющей на установление связи между искомыми параметрами [Шерман и др., 2003].

Обширный статистический материал эффектов землетрясения в окружающей среде (ЕЕЕ) опубликован в итальянской шкале INQUA по 114 землетрясениям, из которых 100 сейсмических событий относятся к интервалу интенсивности в эпицентральной зоне VII-XI баллов по 12-балльной шкале MCS. Автором проанализированы гистограммы распределения числа наблюдений 15 макросейсмических признаков на интервале 3-11 баллов (рис.1). Проведенный статистический анализ гистограмм показал, что многие из выборок имеют согласие с нормальным законом на уровне 0.1% значимости - согласие «слишком уж хорошее», чтобы быть обусловленным случаем [Закс, 1976].

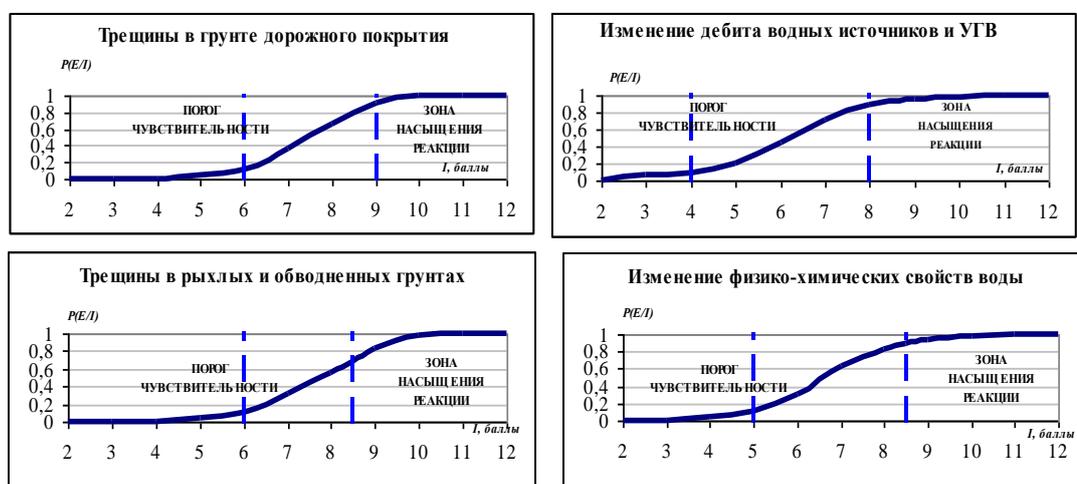


Рис.1. Кривые суммарных относительных частот по данным гистограмм шкалы INQUA

С учетом отмеченных затруднений С.И. Шерманом рекомендовано: 1) использовать предельно схематичную классификацию нарушенности грунтов при сейсмических процессах, например: деформации в грунтах и деформации в кристаллических скальных породах; 2) отбирать макросейсмические признаки, количественные проявления которых обладают наибольшей статистической устойчивостью. Назначение балльности, соответствующей порогу чувствительности и зоне насыщения реакции может быть достаточно надежно установлено на основании сейсмических шкал и имеющихся эмпирических данных.

В силу перечисленных причин становится мало результативным подбор «точных» статистических закономерностей проявления различных признаков на интервале балльности от порога чувствительности до зоны насыщения реакции. Один из многих типов распределения, наблюдающихся в природе и обладающий относительно большим удельным весом в практических приложениях – это нормальный закон. Даже в случае отклонения в распределении экспериментальных данных от нормального закона можно указать, по крайней мере, две причины его широкого применения: 1) использование его в качестве первого приближения; 2) использование преобразования исследуемой случайной величины, которое видоизменяет исходный закон распределения, превращая его в нормальный. Если черты нормального закона в какой-то степени сохраняются и число случайных факторов достаточно велико, то их суммарное распределение стремится к нормальному закону [Кузнецов, 2008]. В этом смысле можно говорить о том, что среди множества распределений нормальный закон является *аттрактором*. Термин «аттрактор» определяется как компактное подмножество фазового пространства динамической системы, все траектории из некоторой окрестности которого стремятся к нему при $t \rightarrow \infty$ [Микиша, 2003].

При описании условных вероятностей случайных событий (макросейсмических признаков) в инженерной и природной средах, наряду с нормальным законом, используется и степенной закон распределения, разница между которыми носит принципиальный характер. В случае нормального распределения можно пренебречь экстремальными событиями, считая их практически невероятными. Распределение, близкое к нормальному закону, относится к так называемым распределениям с «короткими хвостами» [Махутов, 2009]. Статистика величин, описываемых степенным распределением, отличается тем, что экстремальные события, приходящиеся на хвост распределения, происходят недостаточно редко, чтобы ими можно было пренебречь [Vorobyov, 2008]. В этом случае принято считать, что статистические характеристики случайных событий имеют «тяжелые хвосты» распределений. Природа степенных законов распределений связана с наличием сильных нелинейных связей между событиями, тогда как при нормальном законе случайные события считаются независимыми.

Использование нормального закона для определения условных вероятностей макросейсмических проявлений землетрясения в грунтах и рельефе можно считать допустимым при соблюдении определенных методических ограничений. Во-первых, необходимо использовать центральную область распределения, удаленную и от порога чувствительности, и от зоны насыщения реакции, как наиболее устойчивую в статистическом отношении (аналогичные рекомендации предусмотрены шкалой ММСК-92 при определении средневзвешенных оценок интенсивности землетрясения по разным видам и типам объектов). Во-вторых, имеющаяся статистика проявления макросейсмических эффектов более согласуется с нормальным распределением при интенсивности землетрясений 6-9 баллов, которые являются наиболее частыми сейсмическими событиями. Что касается сравнительно более редких событий - сейсмических катастроф с интенсивностью 10-12 баллов, то для их описания может потребоваться применение степенного закона распределения.

Установление взаимосвязи между макросейсмическими признаками и интенсивностью землетрясений автором выполнено на основе современных сейсмических шкал и с использованием нормального закона:

$$P(d) = \frac{1}{\sigma_d \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(d-d_{cp})^2}{2\sigma_d^2}}, \quad (1)$$

где σ_d - стандартное отклонение единичной оценки d ; d_{cp} – среднее значение реакции объекта.

В результате составлены матрицы условных вероятностей макросейсмических признаков в интервале от порога чувствительности H_1 до зоны насыщения реакции H_k :

- 1) для зданий, предметов быта и людей – на базе шкал MMSK-92 и РСШ-2010 (проект);
- 2) для характерных сейсмогеологических эффектов в природной среде: трещины на дорогах с асфальтовым покрытием; трещины во влажных и мерзлых грунтах, трещины в грунтах на равнинах; трещины в грунтах на склонах гор и берегах рек; оползни, оплывины, обвалы; изменение режима подземных вод; возникновение новых или исчезновение существующих источников – по данным в шкалах MMSK-92, РСШ-2002, INQUA Scale и ESI-2007.

В таблицах 1 и 2 представлены фрагменты матриц, а на рисунках 2 и 3 дана графическая интерпретация условных вероятностей повреждений различных типов зданий и реакций людей и предметов быта.

Таблица 1

Условная вероятность повреждений зданий относительно балльности										
Степень повреждений	Тип зданий по MMSK-92	Класс зданий по РСШ-2010	Интенсивность в баллах							
			6	7	8	9	10	11	12	
2	A	C5	0.24	0.50	0.12					
	Б	C6	0.06	0.51	0.44	0.04				
	В, С7	C7		0.19	0.50	0.30	0.03			
	С8	C8		0.10	0.32	0.50	0.13	0.01		
	С9	C9				0.13	0.51	0.40	0.03	
3	A	C5	0.02	0.30	0.50	0.07				
	Б	C6		0.06	0.50	0.37	0.03			
	В, С7	C7		0.02	0.13	0.50	0.32			
	С8	C8		0.02	0.03	0.28	0.50	0.13		
	С9	C9				0.01	0.06	0.51	0.28	

Ряды распределения условных вероятностей макросейсмических признаков на шкале балльности автором получены в первом приближении с использованием нормального закона (1) и различных способов его применения:

1. Если в шкалах для объекта $\vec{E}=(E_1, E_2, \dots, E_p)$ установлено p степеней реакции и определены их интервалы относительно балльности, то возможно получение распределения по степеням реакции объекта E для каждого значения интенсивности H_j из интервала H_1-H_k . Например, относительно интенсивности H_j по известному d_{cp} из шкалы MMSK-92 и в предположении $P(d_{cp}) = 0.5$ находится σ_d и определяются коэффициенты распределения по степеням реакции объекта $E - P(E_i/H_j)_{i=1, p}$. Далее формируются ряды условных вероятностей степеней реакций объекта E относительно балльности $P(E_i/H_j)_{i=1, p, j=1, k}$.

2. Если в шкале описание реакции (нарушенности) объекта E на сейсмические воздействия упорядочено, то есть $E_{H1} < E_{H2} < \dots < E_{Hk}$, где E_i – описание в шкале степени реакции i объекта E при интенсивности H_i баллов, то возможно смоделировать распределение объекта E по k степеням «его реакций» для каждого H_j из интервала H_1-H_k . Параметры распределения определяются из решения системы двух уравнений с двумя неизвестными. Например:

$P(E_i/H_j)_{i=j} = 0.5$ и $P(E_{i+1}/H_j)_{i=j} = 0.25$. По найденным d_{cp} и σ_d определяется коэффициенты распределения по k степеням реакции E при интенсивности H_j баллов –

$P(E_i/H_j)_{i=1, 2, \dots, j-1, j+2, j+3, \dots, k}$ и формируются коэффициенты распределения (условные вероятности степеней реакций объекта E) на шкале балльности $P(E_i/H_j)_{i, j=1, k}$.

3. Если в шкалах описание реакций объекта E на сейсмические воздействия интенсивностью H из интервала H_1-H_k – нечеткое, неупорядочено, либо частично упорядочено (что характерно для раздела «природные явления» во всех сейсмических шкалах, в том числе и современных), то для объектов из шкалы возможно определение рядов распределения условных вероятностей. Предположив, что признак E , соответствующий H_j баллам в шкале, имеет нормальное распределение на оси балльности с максимумом вероятности

равным $P(E/H_j) = 0.4$ и стандартным отклонением $\sigma = 1$, находим остальные коэффициенты распределения относительно балльности $P(E/H_i)_{i=1, 2, \dots, j-1, j+1, j+2, \dots, k}$.

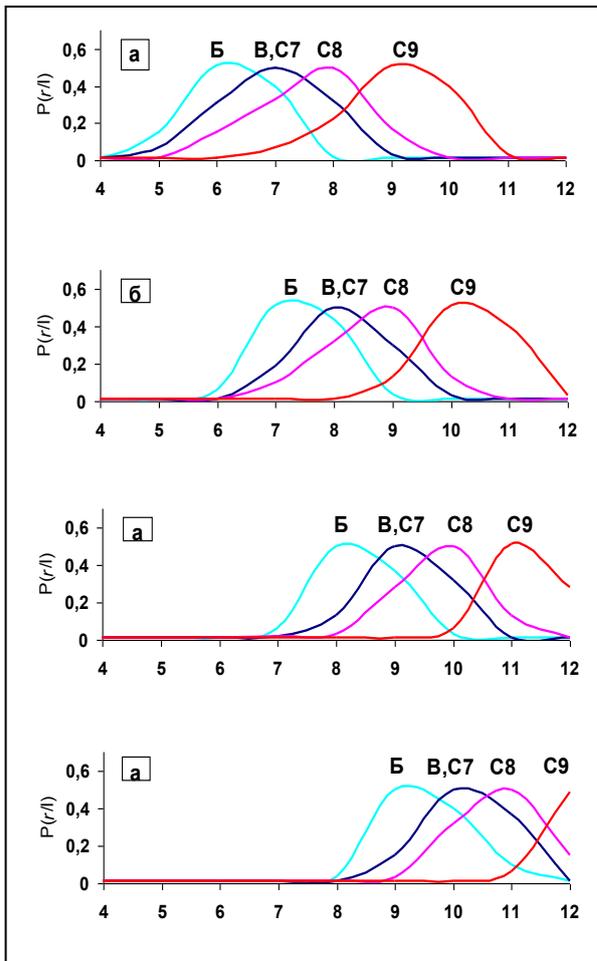


Рис.2. Условная вероятность относительно зон интенсивности для 1-4 степени повреждений зданий типов Б, В, С7, С8, С9.

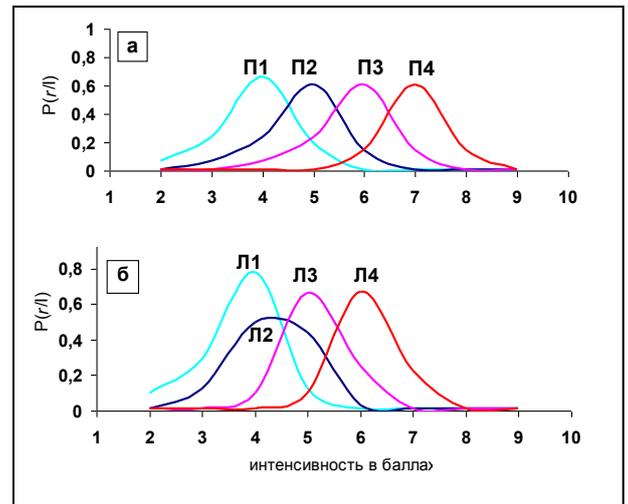


Рис.3. Условная вероятность относительно зон интенсивности для реакций 1-й степени:
а) предметов быта;
б) людей.

Таблица 2

Условная вероятность эффектов землетрясений в природной среде						
Степень нарушения грунтов	Интенсивность в баллах					
	5	6	7	8	9	10
Трещины на дорогах с асфальтовым покрытием (INQUA Scale)						
Отсутствие трещин	0.74	0.21	0.02	0.01		
Незначительные трещины	0.21	0.50	0.21	0.02	0.01	
Сантиметровые трещины	0.03	0.25	0.50	0.21	0.01	
Дециметровые трещины (вспучивание, волнообразование)	0.01	0.03	0.25	0.50	0.18	0.01
Значительные трещины и небольшие вспучивания, волнообразования (широко наблюдаются)		0.01	0.03	0.25	0.53	0.01
Трещины во влажных грунтах и на крутых склонах берегов рек (MMSK-92)						
Менее 1 см шириной	0.74	0.21	0.02	0.01		
Трещины до 3 см	0.21	0.50	0.21	0.02	0.01	
Трещины до 20 см	0.03	0.25	0.50	0.21	0.01	
Трещины до 30 см	0.01	0.03	0.25	0.50	0.17	
Значительные повреждения берегов искусственных водоемов		0.01	0.03	0.25	0.53	0.01

Таким образом, вся макросейсмическая информация, статистическая и описательная, может быть рассмотрена с единых позиций, в рамках которых четко проявляются особенности каждого из признаков. Такое представление макросейсмической информации позволяет, не переводя сейсмогеологические эффекты в ранг шкалы интервалов, что невозможно на современном этапе развития инженерной сейсмологии (проявления в грунтах и рельефе в луч-

шем случае соответствуют рангу шкалы порядка), использовать единый статистический аппарат при обработке результатов наблюдений, включая в общую статистику проявления землетрясений в окружающей среде.

Второе защищаемое положение. Интегральная оценка интенсивности землетрясений с учетом остаточных деформаций грунтов при сейсмических воздействиях в рамках расширенного перечня проявлений землетрясений в окружающей среде.

Рассматривается задача интерпретации комплекса наблюдаемых данных при землетрясении в пункте его регистрации с использованием вероятностных соотношений между макросейсмическими признаками различной природы и интенсивностью землетрясений, установленных в первом защищаемом положении. Конечной целью интерпретации макросейсмического поля является вынесение суждения об интенсивности сейсмического эффекта по результатам реальных наблюдений.

В шкалах типа MMSK предложена процедура осреднения интенсивности землетрясения по правилу средневзвешенной оценки с использованием весовых функций, зависящих от приоритетов разных объектов, количества обследованных объектов и степени близости их реакций к порогу чувствительности и зоне насыщения реакции. Предложенная процедура позволяет получать средние оценки интенсивности землетрясения и их дисперсии, характеризующие качество этих оценок. Предусмотрено также в этих шкалах и определение интенсивности землетрясения по сейсмологическим параметрам (магнитуда, эпицентральное расстояние, глубина очага). Однако по точности такая оценка уступает оценкам по макросейсмическим и инструментальным данным.

Основные положения количественной интерпретации макросейсмических наблюдений сводятся к следующему:

1. Под интерпретацией макросейсмического поля, случайного по природе, понимается его трансформация в поле сейсмического эффекта и определение на этой основе интенсивности сотрясения на однородных в инженерно-геологическом отношении площадках.

2. Любая интерпретация проводится в условиях априорной неопределенности представлений об интенсивности землетрясения и базируется на допущении неизбежно существующих расхождений между наблюдаемым и модельным полями.

3. Под математической моделью макросейсмического поля понимается совокупность сведений о связи с балльностью землетрясения наблюдаемого вектора \bar{E} , компоненты которого представлены в виде условной вероятности $P(E/H)$.

4. Для нахождения интенсивности сейсмического эффекта используются критерии максимального правдоподобия и оценивания по методу максимума апостериорной вероятности.

5. Исчерпывающей характеристикой качества интерпретации служит соотношение априорных и апостериорных оценках. В этом смысле критерию Байеса принадлежит ведущая роль в решении задачи интерпретации макросейсмических наблюдений.

6. Устойчивость получаемых оценок не может быть сделана сколь угодно высокой, так как она определяется информационным вкладом экспериментального материала и априорных допущений.

Степень нашей разумной уверенности в некотором утверждении, касающемся оценки неизвестного численного значения параметров, возрастает и корректируется по мере пополнения имеющейся информации относительно исследуемого природного явления [Айвазян, 2001]. Один из возможных способов формализации этого тезиса связан с использованием формулы Байеса. Специфика Байесовского подхода основана на двух положениях: 1) Степень уверенности в справедливости некоторого утверждения численно выражается в виде вероятности. Это означает, что вероятность в Байесовском подходе выходит за рамки ее интерпретации в терминах статистического ансамбля. 2) В качестве исходной используется одновременно информация двух типов: априорная и исходные статистические данные. При этом первая представляется в виде некоторого априорного распределения вероятностей анализируемого параметра. По мере поступления исходных данных это распределение уточня-

ется по формуле Байеса, с помощью которой обеспечивается переход от априорного к апостериорному распределению.

Байесовский подход позволяет организовать пошаговое обследование ситуации, в процессе которого можно уточнить первоначальное предположение об априорной вероятности гипотезы. С поступлением новой порции информации E , относительно начальной гипотезы H , степень уверенности в том, что действительно имеет место гипотеза H , изменяется на величину, пропорциональную условной вероятности $P(E/H)$.

Оценка сейсмического эффекта методом проверки гипотез осуществляется по формуле Байеса (2), и состоит в том, что на основании наблюдаемой случайной выборки требуется оценить апостериорную вероятность по всем гипотезам:

$$P(H_i | E_j) = \frac{P(H_i)P(E_j | H_i)}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P(E_j | H_i)}, \quad (2)$$

где H_i – гипотеза, нуждающаяся в подтверждении на основании признака E_j .

В 2008-2009 г. группой сотрудников Института земной коры, в том числе и автором, проведено тестирование шкалы ESI-2007 на примере реального сейсмического события 27.08.2008 г. на Южном Байкале. Цель исследования заключалась в определении и сравнении оценок интенсивности землетрясения, полученных по шкалам MSK-64, по ESI-2007 и формуле Байеса. Проведено также исследование шкалы ESI-2007 с точки зрения оценки ранга шкалы. Анализ показал, что шкалу ESI-2007 нельзя отнести по рангу даже к шкале порядка. Подобное исследование является одним из первых опытов применения новой шкалы на примере регионального сейсмического события.

По данным обследования последствий землетрясения на Байкале 27 августа 2008 года в поселке Култук представлены в таблице 3 результаты оценок сейсмического эффекта, а на рисунке 4 дана графическая интерпретация интегральных оценок с использованием формулы Байеса. Интерпретация сейсмического эффекта землетрясения проведена на интервале VI-IX баллов при различных вариантах априорных оценок: от полной неосведомленности о параметрах землетрясения (магнитуда, интенсивность землетрясения в эпицентральной зоне, эпицентральное расстояние до пункта наблюдения) в первом варианте до гипотезы, совпадающей с апостериорной в четвертом варианте. Такой выбор интервала объясняется желанием автора продемонстрировать независимость оценок от априорных соображений.

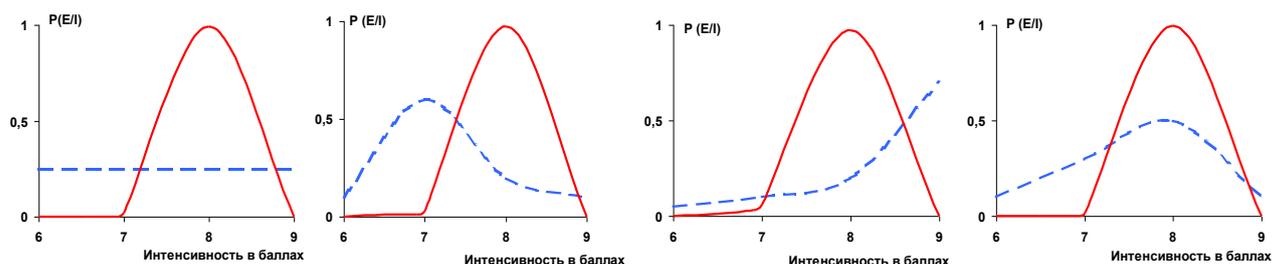


Рис.4. Оценка интенсивности землетрясения 27.08.08 г. в пос. Култук по Байесу

- - априорная оценка;
- - апостериорная оценка.

По архивным данным проведена оценка макросейсмического эффекта исторических землетрясений на территории Прибайкалья и Забайкалья (Цаганское, 1962 г. и Средне-Байкальское, 1903 г.).

Вероятностные оценки интенсивности землетрясения в пос. Култук 27.08.2008 г. по Байесу

Оценка землетрясения	Вариант	Априорные оценки				Апостериорные оценки			
		Интенсивность в баллах							
		VI	VII	VIII	IX	VI	VII	VIII	IX
По реакции зданий, предметов быта и людей	1	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0.038	0.962	0
	2	0.40	0.30	0.20	0.10	0	0.055	0.944	0
	3	0.10	0.20	0.30	0.40	0	0.025	0.974	0
	4	0.10	0.30	0.50	0.10	0	0.023	0.977	0
По эффектам землетрясения на поверхности земли	1	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0.177	0.819	0.004
	2	0.40	0.30	0.20	0.10	0	0.244	0.754	0.002
	3	0.10	0.20	0.30	0.40	0	0.125	0.869	0.006
	4	0.10	0.30	0.50	0.10	0	0.115	0.884	0.001
Интегральная оценка	1	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0.008	0.992	0
	2	0.10	0.60	0.20	0.10	0	0.025	0.975	0
	3	0.10	0.20	0.30	0.40	0	0.006	0.994	0
	4	0.05	0.10	0.15	0.70	0	0.060	0.974	0

Таким образом, при оценке сейсмического эффекта с использованием формулы Байеса количественная мера интенсивности сейсмического события формируется на основе статистических данных реакции зданий, предметов быта, людей и эффектов на поверхности земли, заложенных в сейсмических шкалах. При этом используется вся информация, содержащаяся в макросейсмических признаках, а сам процесс количественной оценки интенсивности землетрясения приобретает более объективный характер.

Третье защищаемое положение. Информационно-статистическая система для оценки уровня сейсмостойкости природно-технических объектов по результатам их динамических испытаний.

При натуральных экспериментах с использованием вибровозбудителей большой мощности в верхних слоях земной коры возникает волновое поле вибрационного источника [Активный физический мониторинг..., 2005], которое является аналогом макросейсмического поля реального землетрясения. Система «вибровозбудитель – сооружение» служит источником колебаний грунтового основания. Практическим примером являются натурные испытания 10-этажного жилого дома с монолитными стенами массой 11000 тонн с помощью восьми вибраторов типа В-3 и электродвигателя мощностью 110 кВт, при которых гармонические колебания были зарегистрированы сеймостанцией Иркутск-1 на расстоянии 5 км от опытного объекта. При этом волны, аналогичные сейсмическим (вибрационный сигнал), распространяясь в грунтовой среде, преодолели русло р. Ангары.

В основе аналогии искусственно создаваемых вибрационным источником волновых полей и колебательного процесса поверхности земли при землетрясениях лежат два основных фактора. Во-первых, это одинаковая физическая природа колебаний земной коры (при различном спектральном составе колебаний); во-вторых, информационная идентичность обоих физических полей, ориентированных сейсмическими шкалами на фиксацию остаточных смещений грунта, конструкций зданий и повреждений в них, положения предметов быта и других постсейсмических явлений. Эти факторы образуют *физическую* основу для создания информационно-статистической системы. Ее математическим аппаратом служат многомерные статистические методы (информационные статистики, дискриминантный и кластерный анализ и др). В отличие от работ А.А. Романа и Н.И. Онофрasha [1979] в данном исследовании речь идет не столько о применении сходных математических методов для решения задач сейсмического районирования и сейсмостойкого строительства, сколько о создании информационно-статистической системы на единой физической и математической основе.

Разработанная ЦНИИСК и КазНИИССА методика оценки сейсмостойкости зданий [Поляков и др., 1986] основана на сравнении фактически достигнутой реакции здания при

вибрационном нагружении (диаграммы нагружения) со спектрами нелинейной диссипативно-нестационарной системы под воздействием инструментальных акселерограмм реальных землетрясений. Предложенный алгоритм служит методическим «мостиком» для перехода от результатов вибрационных испытаний к оценке сейсмостойкости опытного объекта с использованием динамической модели здания в виде системы с одной степенью свободы и спектральной формы представления результатов анализа. На рисунке 5 показаны спектры реакций диссипативной нестационарной одномассовой системы на масштабированные акселерограммы реальных землетрясений (на 70 см/с^2), и экспериментальные спектры реакций (в уровне $\eta = 1$) при вибрационных испытаниях 9-этажного жилого дома. Пересечение спектров на резонансном периоде 0.6 с свидетельствует о том, что максимальный уровень вибрационного нагружения на этом этапе испытаний может быть оценен в 6.5 баллов, так как ускорение грунта 70 см/с^2 согласно СНиП II-7-81* соответствует интервалу ускорений $50\text{-}100 \text{ см/с}^2$ или интервалу интенсивности землетрясения в 6-7 баллов.

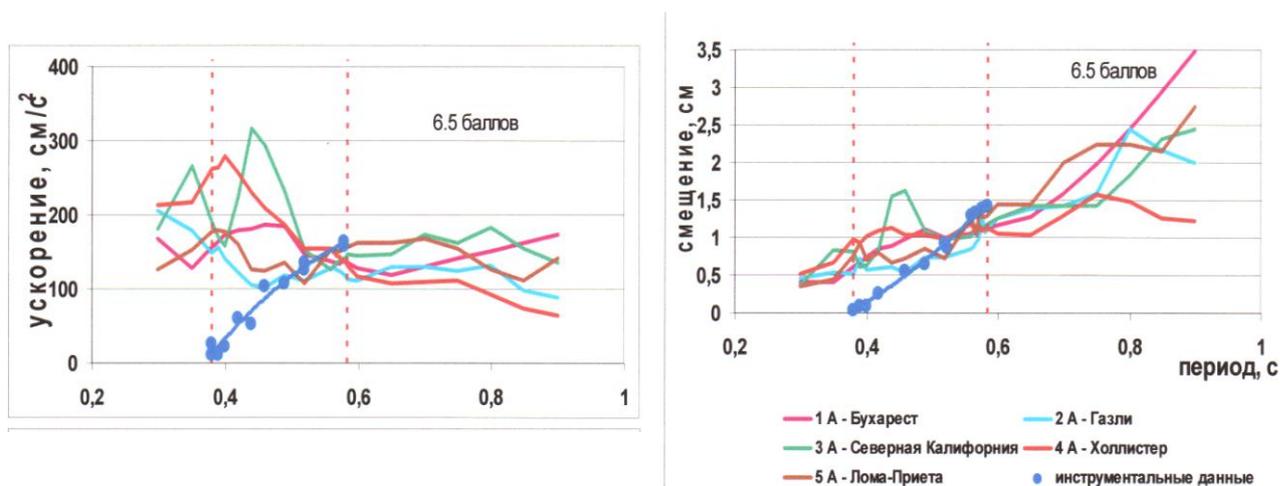


Рис.5. Спектры реакций диссипативной нестационарной одномассовой системы и экспериментальные спектры в уровне $\eta=1$. Вибрационные испытания 9-этажного жилого дома с безригельным каркасом.

По усовершенствованной методике, предложенной автором, на рис. 6 и в таблицах 4 и 5 представлены результаты интерпретации реакций 3-этажного фрагмента безригельного каркаса при вибрационных испытаниях. В качестве расчетной модели принята пространственная диссипативная нестационарная модель, формирование которой выполнено по программе SCAD. Поскольку записи сильных землетрясений для Прибайкалья отсутствуют, ансамбль акселерограмм составлен по данным мирового банка записей сильных движений с учетом параметров зон возможных очагов землетрясений для территории, на которой находится объект испытания (магнитуда, глубина очага, макросейсмическая интенсивность в эпицентральной зоне, эпицентральное расстояние, инженерно-геологические условия). Коэффициент масштабирования акселерограмм подбирался из условия достижения равенства максимальных ускорений в уровне покрытия на модели и на объекте испытания. Оценки сейсмостойкости опытных объектов по результатам вибрационных испытаний получены по методике с использованием информационных статистик на базе вероятностной инструментальной шкалы сейсмической интенсивности, разработанной Ф.Ф. Аптикаевым [Artikaev,1993].

Сущность усовершенствованной методики заключается в переходе от физического эксперимента к математическому моделированию. При этом физико-механические характеристики расчетной динамической модели принимаются на основании экспериментальных данных, зарегистрированных в процессе вибрационных испытаний.

Максимальные амплитуды акселерограмм в м/с², при воздействии которых на модель здания достигается равенство максимальных ускорений в уровне покрытия на модели и на фрагменте

91

Экспериментальные данные	№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Максимальное ускорение на покрытии, м/с ²		4,5	4,0	3,4	4,2	9,7	10,5	9,7	9,0	9,2	9,5
Резонансный период		T=0,18с	T=0,20с	T=0,22с	T=0,24с	T=0,26с	T=0,32с	T=0,37с	T=0,39с	T=0,42с	T=0,43с	T=0,50с
Максимальные амплитуды акселерограмм землетрясений, м/с ²	Холлистер-74	0,78	0,80	0,69	1,0	2,51	1,97	1,79	1,65	1,76	1,86	1,74
	Лома-Приета-99	1,64	1,11	1,33	1,38	4,04	2,78	2,47	2,77	3,48	3,27	1,57
	Тайвань-99	1,58	1,34	1,36	1,37	2,64	4,05	2,42	2,36	2,29	2,76	2,03
	Италия-76	1,33	1,34	0,91	1,0	1,33	2,85	2,76	2,67	3,10	3,03	1,65
	Турция-99	0,90	0,89	0,83	1,0	2,08	2,29	2,56	3,04	4,27	4,24	3,03
	Бухарест-74	2,48	1,74	1,62	2,35	4,20	4,33	3,47	2,62	2,36	2,40	2,0
	Газли-76	1,37	1,57	1,47	1,55	3,80	3,03	3,21	3,09	3,77	4,31	3,40
	Япония-99	1,68	1,76	1,43	1,54	4,00	4,37	2,20	1,86	1,82	1,94	2,90
Керн-Каунти-52	1,12	1,11	0,69	0,82	2,20	1,46	1,64	1,56	1,51	1,42	1,30	
Определение 95% доверительного интервала*	Среднее значение	1,43	1,30	1,11	1,33	2,98	3,01	2,50	2,40	2,71	2,80	2,18
	K ₁ *CAO	0,37	0,28	0,30	0,34	0,9	0,83	0,44	0,48	0,84	0,81	0,62
	μ	1,43±0,37	1,30±0,28	1,11±0,30	1,33±0,34	3,01±0,92	3,01±0,83	2,50±0,44	2,40±0,48	2,71±0,84	2,80±0,81	2,18±0,62
	Доверит. интервал	1,1□μ□1,8	1,0□μ□1,6	0,8□μ□1,4	1,0□μ□1,7	2,1□μ□3,9	2,2□μ□3,8	2,1□μ□2,9	1,9□μ□2,9	1,9□μ□3,6	2,0□μ□3,6	1,6□μ□2,8

Обозначение: K₁ – коэффициент для определения 95% доверительных границ для среднего значения по среднему абсолютному отклонению (CAO).
*Определение доверительного интервала проведено по Л. Заксу «Статистическое оценивание», 1976 г.



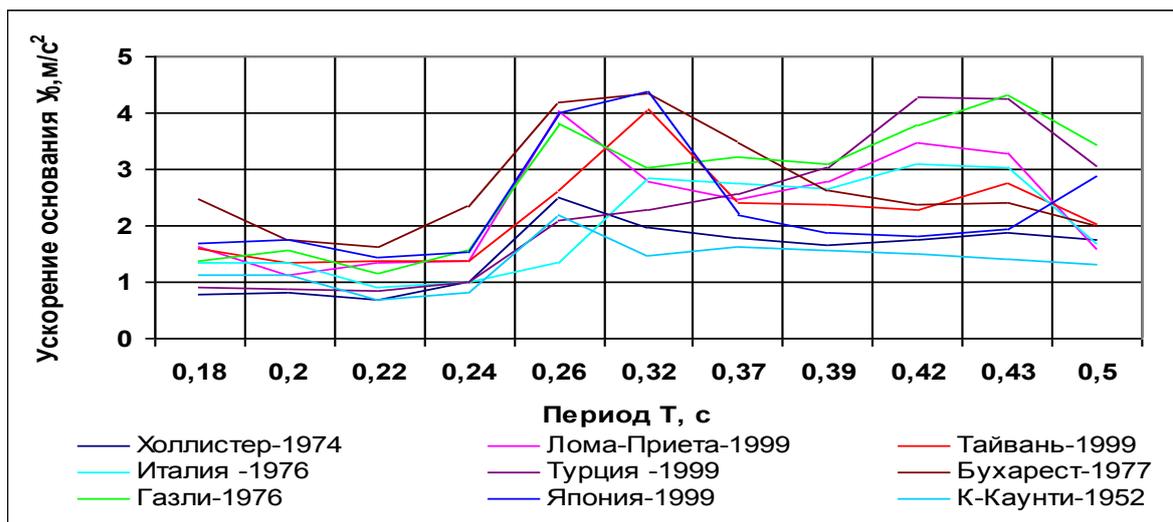


Рис.6. Спектры инструментальных акселерограмм, при воздействии которых на модель 3-этажного фрагмента безригельного каркаса достигается равенство максимальных ускорений в уровне покрытия на модели и на фрагменте.

Таблица 5

Сводная таблица оценок сейсмического эффекта, достигнутого при вибрационных испытаниях 3-этажного фрагмента безригельного каркаса

Резонансные периоды, с		95% доверительный уровень ускорений грунта, см/с^2		Аптикаев, логарифмическое уровнение $\lg A = -0.75 + 0.4I \pm 0.08$		Оценка интенсивности с помощью информационных статистик	MSK-64	МСН СНГ
Этап	$T^p, \text{с}$	Интервал, баллы	$A_{\text{ср.}}$	Интервал, баллы	$I_{\text{ср.}}$	Интервал, баллы	I , баллы	I , баллы
1	0.18	110-180	143	6.9-7.5	7.2	7.0-7.5	8	>7
2	0.20	100-160	130	6.8-7.4	7.1	7.0-7.5	8	>7
3	0.22	80-140	111	6.7-7.3	7.0	7.0-7.5	7-8	7
4	0.24	100-170	133	6.9-7.5	7.2	7.0-7.5	8	>7
5	0.26	210-390	298	7.7-8.3	8.0	8.0-8.5	>8	>8
6	0.32	220-380	301	7.7-8.3	8.0	8.0-8.5	>8	>8
7	0.37	210-290	250	7.6-8.0	7.8	8.0-8.5	>8	8
8	0.39	190-290	240	7.6-8.0	7.8	8.0-8.5	>8	8
9	0.42	190-360	271	7.6-8.2	7.9	8.0-8.5	>8	>8
10	0.43	200-360	280	7.6-8.2	7.9	8.0-8.5	>8	>8
11	0.50	160-280	218	7.4-8.0	7.7	7.5-8.0	>8	8

Таким образом, нелинейная нестационарная система заменяется последовательностью линейно – упругих моделей, частоты которых соответствуют частотам резонансных колебаний на различных этапах динамического нагружения. Согласно данной методике прогноз состояния исследуемых объектов при реальных сейсмических воздействиях по результатам вибрационных испытаний включает в себя несколько этапов: построение динамической расчетной модели; выбор представительной выборки внешних воздействий; определение критериев оценки результатов экспериментально - аналитических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа представляет собой дальнейшее развитие исследований в области региональных шкал сейсмической интенсивности, научно-методическая основа которых разработана под руководством проф. С.И. Шермана. Основное внимание в работе уделено наи-

менее разработанному аспекту проблемы – учету геологических эффектов и макросейсмическим проявлениям землетрясений в грунтах и рельефе.

Для решения этой проблемы разработана информационно-статистическая система, способная поддерживать широкий класс моделей от статистической интерпретации макросейсмического поля до построения расчетных моделей зданий при динамических, в частности вибрационных, воздействиях на природно-технические объекты. Система представляет собой совокупность информационно-статистических методов интерпретации многоуровневой и разнородной информации. Решающее значение придается назначению балльности, соответствующей порогу чувствительности и зоне насыщения реакции. Эти параметры устанавливаются на основании сейсмических шкал и имеющихся эмпирических данных.

При построении системы использован методологический аппарат системного анализа, органически сочетающегося с байесовским подходом в использовании соотношения между априорной и апостериорной информацией. Суть указанной методологии состоит в пошаговом приведении исходной модели к состоянию, подобному объекту-оригиналу, путем включения в модель программных механизмов адаптации и интерпретации. В информационно-статистической системе указанные механизмы реализованы в процессе корректировки базы данных по мере поступления новой информации в форме матриц условных вероятностей проявления различных макросейсмических признаков на основе модернизированных сейсмических шкал типа MMSK.

Исследованы вероятностные законы распределения геологических эффектов, согласующихся с имеющимися экспериментальными данными. В качестве адекватного математического аппарата использованы информационные статистики. Суть их состоит в преобразовании макросейсмического поля в поле сейсмического эффекта оптимальными методами по критерию максимума используемой информации. Полученные оценки интенсивности землетрясения с использованием информационных статистик демонстрирует высокую информативность макросейсмического поля, отличаются устойчивостью относительно наблюдаемых макросейсмических признаков и в меньшей степени зависят от априорных оценок.

При построении базы данных использован нормальный закон распределения числа объектов по степеням их реакции, статистически обоснованный для зданий и подтвержденный позднейшими исследованиями для реакции предметов быта и людей. Макросейсмические проявления в грунтах и рельефе, в лучшем случае, соответствуют рангу шкалы порядка. Сформулированы методические ограничения, соблюдение которых позволяет не переводя геологические эффекты в ранг шкалы интервалов, использовать единый статистический аппарат при обработке результатов наблюдений.

Приведены уточненные вероятностные зависимости реакции для всех типов зданий, предметов быта и реакций людей в зависимости от интенсивности землетрясений в диапазоне от 2 до 12 баллов шкалы MMSK-92, которая обладает преимуществом по отношению к шкале MSK-64. При этом вместо ограниченной статистики части объектов с максимальными степенями реакции, принятой в устаревшей шкале MSK-64, используется вся эмпирическая информация и расширенный перечень макросейсмических признаков.

На основе проведенных исследований подготовлен проект Территориального стандарта региональной шкалы сейсмической интенсивности для Прибайкалья. Внедрение количественной методики макросейсмической оценки интенсивности исторических и современных землетрясений способствует получению однородных статистических рядов сейсмических событий на единой научно – методической основе.

Разработанная информационно-статистическая система оказалась применимой и при исследованиях сейсмостойкости зданий при динамических испытаниях опытных объектов. При идентификации расчетных моделей зданий под воздействием динамических нагрузок применены статистические методы, как наиболее соответствующие случайной природе внешнего воздействия, взамен детерминистских методов, используемых существующими методиками. Усовершенствованная методика нашла практическое применение при вибрационных испытаниях ряда опытных объектов (Иркутск, 2004 г).

В заключение отметим, что одна из наиболее сложных научно-методических проблем в использовании современных сейсмических шкал – интегральная оценка интенсивности землетрясений по совокупности неоднородных факторов рассмотрена в данной работе с единых позиций системного анализа многоуровневой и разнородной информации с учетом новейших экспериментальных данных о проявлениях землетрясений в окружающей среде. Несмотря на то, что многие из вопросов нуждаются в дальнейшем уточнении и обобщении, содержание работы в целом отражает некоторый законченный этап информационно-статистических методов интерпретации макросейсмического поля и представляет практический интерес.

Основные результаты опубликованы в работах:

1. Голенецкий С.И., Бержинская Л.П., Ордынская А.П., Бержинский Ю.А. Макросейсмические проявления землетрясений 29.06.1995 г. и 25.02.1999г. в гор. Иркутске, Ангарске, Шелехове//Сейсмическая опасность и воздействия. Тезисы межд. науч. конф. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2000. С.38-40.
2. Бержинский Ю.А., Ордынская А.П., Рашутина Н.В. Использование информационных статистик при оценке макросейсмического эффекта Тункинского землетрясения (30.06.95 г.)//«Город: прошлое, настоящее, будущее». Иркутск, ИГТУ, 1998. С.72-77.
3. Бержинский Ю.А., Ордынская А.П., Бержинская Л.П., Павленов В.А., Использование фрикционных демпфирующих устройств для снижения реакции опорной конструкции, несущей оборудования при сейсмических воздействиях// Сейсмическая опасность и воздействия. Тезисы межд. науч. конф. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2000. С.60-62.
4. Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Ордынская А.П., Бержинская Л.П. Опыт проведения вибрационных и сейсмозрывных испытаний зданий в сейсмических районах Иркутской области //Труды VI межд. конф. «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф». Том 2, Красноярск, 2001. С. 150-152.
5. Ордынская А.П. Оценка интенсивности землетрясения по совокупности макросейсмических и инструментальных данных//V Российская нац. конф. по сейсм. стр-ву и сейсм. районированию с межд. участием. Сб. тезисов докладов. М., 2003. С.23.
6. Радзиминович Н.А., Гилева Н.А., Мельникова В.И., Масальский О.К., Радзиминович Я.Б., Ружич В.В., Бержинская Л.П., Ордынская А.П., Емельянова И.А., Смекалин О.П. Южно-Байкальское землетрясение 25 февраля 1999года с $K_p = 14.6$, $I_0 = 8$ (Прибайкалье) //Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. Сб. науч. тр. Обнинск, 2005, С.264-280.
7. Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Бержинская Л.П., Ордынская А.П., Масленникова Г.Н., Шерман П.С. Оценка сейсмостойкости зданий с помощью вибрационных испытаний// 2-й межд. симпозиум: Активный геофизический мониторинг литосферы земли. Материалы межд. конференции. Новосибирск, 2005. С.412-417.
8. Ордынская А.П., Бержинский Ю.А. Оценка интенсивности землетрясения с использованием информационных статистик// Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Материалы Всерос. совещ. «Современная геодинамика и сейсмичность Центральной Азии». Вып. 3. Иркутск, 2005. С.342-348.
9. Ордынская А.П. Геоинформатика и оценка интенсивности землетрясений// VI Российская конф. по сейсм. стр-ву и сейсм. районир. с межд. участием. Сб. тезисов, 2005. С. 37.
10. Ордынская А.П., Бержинский Ю.А. Оценка реакции объектов при воздействиях типа сейсмических с использованием информационных технологий// VII Российская конф. по сейсм. стр-ву и сейсм. районир. с межд. участием. Сб. тезисов, Сочи, 2007. С.109-110.
11. Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Киселев Д.В., Ордынская А.П. Идентификация динамической модели фрагмента безригельного каркаса с использованием ВК SCAD// WWW.CADMASTER.ru, №2 (37), 2007. С.94-98.
12. Ордынская А.П. Интегральная оценка интенсивности проявлений землетрясений в природной среде и техносфере // Научно-технический журнал ВНИИГПИ Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №5, 2010. С.35-41.