

ГОССТРОЙ РОССИИ

**ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА
И ИНФОРМАЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
(ВНИИНТПИ)**

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

*Профессор геофизики, доктор физико-математических наук В.И. УЛОМОВ,
кандидат физико-математических наук Л.С. ШУМИЛИНА
Объединенный институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук*

Научный редактор академик В.Н.Страхов

ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

(*Уломов В.И., Шумилина Л.С. Проблемы сейсмического районирования территории России.// Всероссийский НИИ проблем научно-технического прогресса и информации в строительстве. М.: ВНИИНТПИ Госстроя России. 1999. 56 с.)*

**МОСКВА
1999 г.**

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	
ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ.....	
СЕЙСМОГЕОДИНАМИКА СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ.....	
Глобальная упорядоченность сейсмоактивных регионов.....	
Сейсмичность и сейсмический режим регионов Северной Евразии.....	
Фрактальная решеточная модель сейсмогенеза.....	
МОДЕЛЬ ОЧАГОВЫХ ЗОН.....	
Линеаментно-доменно-фокальная модель сейсмических источников.....	
Виртуальная сейсмичность.....	
МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА.....	
История вопроса и постановка задачи.....	
Методика вычисления сейсмической опасности.....	
Связь интенсивности с магнитудой и расстоянием.....	
Детальность карты, расчетный период T и точность вычислений.....	
Модельный каталог.....	
Интенсивность сотрясений.....	
КОМПЛЕКТ КАРТ ОБЩЕГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ.....	
Площади зон сейсмической интенсивности на картах ОСР-97 России.....	
Поверхностные дислокации вдоль линеаментных структур.....	
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО.....	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
ЛИТЕРАТУРА	
Список организаций – участников исследований.....	

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения по своим разрушительным последствиям, количеству жертв, материальному ущербу и деструктивному воздействию на среду обитания человека занимают одно из первых мест среди других природных катастроф. Землетрясения возникают внезапно и это еще больше усугубляет их разрушительные последствия. Негативные последствия катастрофических землетрясений (людские потери, отсутствие жилищ, нарушения экономических связей, необходимость разработки новых строительных стандартов и др.) могут ощущаться в течение нескольких десятилетий и поглощать значительную часть национального бюджета. Предсказать время возникновения очередных сейсмических толчков, а тем более предотвратить их, к сожалению, невозможно, однако разрушения и число человеческих жертв могут быть уменьшены путем проведения в сейсмоактивных районах разумной и долгосрочной государственной политики, основанной на повышении уровня осведомленности населения и федеральных органов об угрозе землетрясений и умении противостоять подземной стихии. Первым и самым важным шагом на пути снижения ущерба от землетрясений является сейсмическое районирование сейсмоактивных территорий, необходимое для планирования рационального землепользования и осуществления адекватного сейсмостойкого строительства.

Землетрясения неизбежны. Они обусловлены продолжающейся десятки и сотни миллионов лет глобальной эволюцией литосферы нашей планеты. Вместе с тем, как будет показано ниже, в развитии геодинамических и сейсмических процессов существуют определенные пространственно-временные и энергетические закономерности, которые позволяют более или менее надежно дифференцировать территории по степени их геодинамической активности и сейсмической опасности. Например, обнаружено, что очаги землетрясений не рассеяны хаотично, а приурочены к протяженным и относительно узким зонам активных разломов и других менее прочных структур земной коры и всей литосферы, т.е. к местам, наиболее уязвимым для быстрых сейсмогеодинамических подвижек. Выявление местоположения таких сейсмоактивных, а следовательно и сейсмоопасных, геологических структур, тщательное изучение их сейсмогеодинамического режима и сейсмического эффекта, создаваемого ими на земной поверхности и положено в основу сейсмического районирования. Сейсмическое районирование – это картирование сейсмической опасности.

В зависимости от задач, степени детальности и масштаба исследований сейсмическое районирование может быть общим или обзорным (ОСР, масштаб 1:5.000.000 – 1:2.500.000), детальным (ДСР, масштаб 1:1.000.000 – 1:100.000) и микросейсмическим (сейсмическое микрорайонирование – СМР, масштаб 1:50.000 и крупнее). ДСР применяется для уточнения сейсмической опасности отдельных регионов, административных территорий и т.п. СМР используется, как правило, для сейсмического микрорайонирования населенных пунктов, участков крупного гражданского, промышленного, гидротехнического и прочего строительства. При этом учитываются локальные факторы усиления сейсмического эффекта из-за неблагоприятных грунтовых условий, а также ценность и уязвимость существующих зданий и инфраструктур. Однако первостепенным и опорным для всех этих построений непременно является ОСР, основанное на региональных и межрегиональных сейсмологических и геолого-геофизических исследованиях, способствующих выявлению планетарных, региональных и межрегиональных сейсмогеодинамических взаимодействий литосферных плит и блоков земной коры.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

В конце XIX – начале XX столетия, благодаря выдающемуся вкладу отечественных ученых в мировую сейсмологию, Россия в течение многих лет играла ключевую роль в науке о землетрясениях. Геологическую основу изучения природы землетрясений заложили И.В.Мушкетов и А.Н.Орлов [17, 18, 20], создавшие первый российский каталог землетрясений. С именем академика Б.Б. Голицына [5] связано изобретение принципиально новых сейсмографов и начало систематических исследований сейсмичности и внутреннего строения Земли. Углубленный анализ связи сейсмических и геологических процессов и явлений был продолжен в Сейсмологическом институте АН СССР (родоначальник нынешнего ОИФЗ) Д.И. Мушкетовым, выделившим целый ряд сейсмоактивных регионов и опубликовавшим в 1933 г. первую макросейсмическую карту сейсмического районирования Средней Азии.

Первая в Европе и мире официальная нормативная карта сейсмического районирования всей территории бывшего СССР была опубликована в 1937г. Г.П.Горшковым, положившим начало их регулярному составлению в качестве основы, регламентирующей проектирование и строительство в сейсмоактивных районах страны [3]. В конце 40-х годов исследования Г.П.Горшкова [4], И.Е.Губина [6], а впоследствии С.В.Медведева [14], Ю.В.Ризниченко [22] и других ученых, привели к смене существовавшей до того времени парадигмы «сейсмического актуализма» («там, где было, там и будет») и заложили основы сейсмогенетического двухстадийного метода оценки сейсмической опасности с элементами прогноза. В соответствии с этой концепцией на первой стадии выделяются реальные и потенциальные очаговые зоны, а на второй – рассчитываются генерируемые ими сотрясения на земной поверхности. Новой парадигмы придерживались практически все составители последующих карт общего (или обзорного) сейсмического районирования (ОСР) – 1957г. (редакторы С.В. Медведев, Б.А. Петрушевский), 1968г. (ред. С.В. Медведев) и 1978г. (ред. М.А.Садовский) [28]. В создании двух последних карт ОСР активное участие принимали местные специалисты из бывших союзных республик и регионов. Все исследования регулярно финансировались Госкомитетом СССР по науке и технике в рамках многолетней научно-технической программы «Сейсмология и сейсмостойкое строительство». Координация работ осуществлялась Междуведомственным советом по сейсмологии и сейсмостойкому строительству (председатели в разное время - Е.Ф. Саваренский, С.Л. Соловьев, М.А. Садовский).

Исторический очерк развития сейсмологических исследований и подробное описание применяемых ранее методов сейсмического районирования, а также критику в их адрес, можно найти в работах [1, 9, 16, 28, 35, 38, 51 и др.].

Сейсмическое районирование – одна из наиболее сложных и чрезвычайно ответственных проблем современной сейсмологии. О социальной, экономической и экологической значимости ее говорить не приходится. Научная же сложность проблемы состоит, прежде всего, в том, что она принадлежит к категории прогнозов, базирующихся на неполной информации, скудном и не всегда удачном опыте, на недостаточно четких методологических позициях. Поэтому каждая из составленных в прошлые годы карт сейсмического районирования территории бывшего СССР в той или иной мере оказывалась неадекватной реальным природным условиям, что наряду с некачественным строительством наносило народному хозяйству огромный материальный ущерб и влекло за собой многочисленные человеческие жертвы. И хотя по мере накопления дополнительной информации о землетрясениях и совершенствования сейсмологических знаний карты сейсмического районирования систематически обновлялись и несколько улучшались,

фрагментарно они изменялись гораздо чаще – практически после каждого крупного землетрясения, происходящего в районах, показанных на действовавших картах как менее опасные в сейсмическом отношении.

Такая участь постигла и созданную в 1978 г. карту ОСР-78 (Рис. 1): в течение последнего десятилетия практически ежегодно на территории бывшего СССР возникали разрушительные 8–9- и даже 9–10-балльные землетрясения в зонах, опасность которых, судя по этой карте, оказалась заниженной по меньшей мере на 2–3 балла. К их числу относятся катастрофическое Спитакское землетрясение 1988 г. в Армении, Зайсанское землетрясение 1990 г. – в Казахстане, Рача-Джавское 1991 г. – в Грузии, Суусамырское 1992 г. – в Киргизии, Хаилинское 1991 г. и Нефтегорское 1995 г. – в России (в Корьякии и на Сахалине) (Рис.1). Последнее повлекло за собой гибель около двух тысяч человек и полную ликвидацию городского поселка Нефтегорск. Оно было самым разрушительным из известных в прошлом землетрясений на территории Российской Федерации [42].

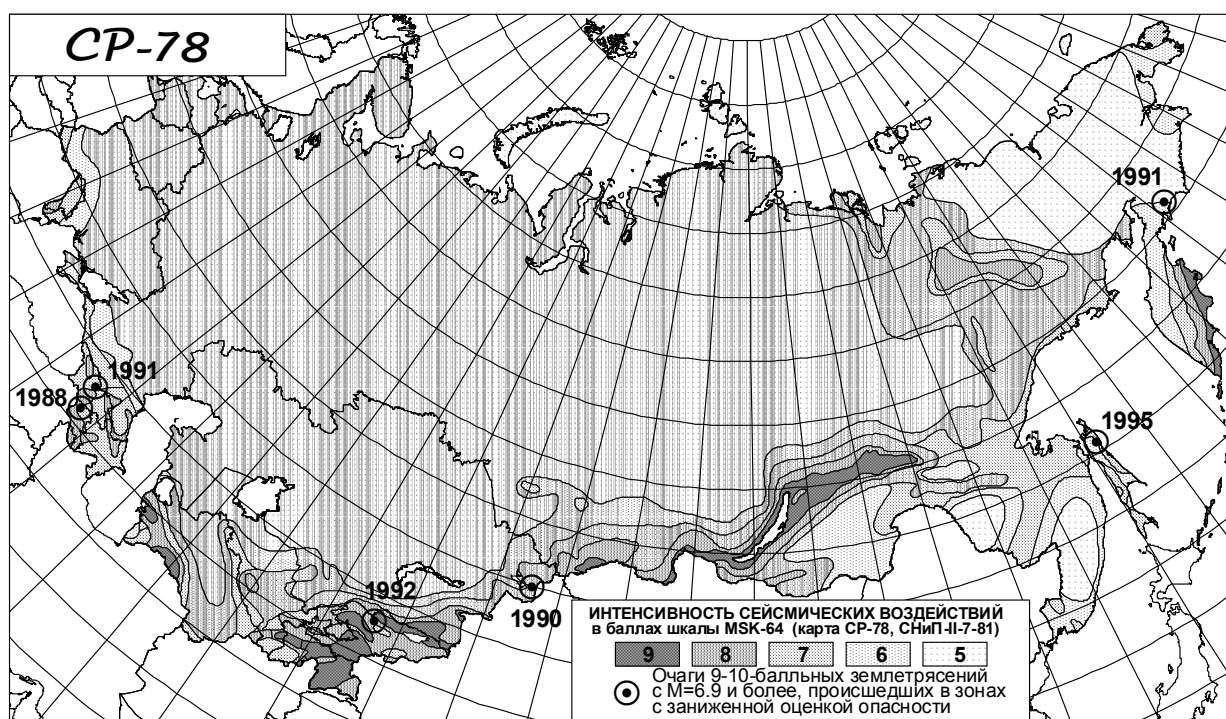


Рис. 1. Карта общего сейсмического районирования ОСР-78 территории бывшего СССР и эпицентры сильных землетрясений, происшедших в зонах с заниженной оценкой сейсмической опасности (слева направо: Спитак, 1988 г.; Рача-Джава, 1991 г.; Суусамыр, 1992 г.; Зайсан, 1990 г.; Нефтегорск, 1995 г.; Хаилино, 1991 г.).

На расширенном заседании Ученого совета ИФЗ АН СССР, состоявшемся 21 февраля 1990 г., было принято решение приступить к комплексным исследованиям по созданию новой карты общего сейсмического районирования территории бывшего СССР. Руководителем исследований был утвержден В.И.Уломов, приглашенный в Москву из Ташкента. До получения новых результатов по сейсмическому районированию, в связи с произошедшими сейсмическими событиями, в карту ОСР-78 для территории Российской Федерации были оперативно внесены исправления в виде двух Временных схем (ВС) сейсмического районирования – Северного Кавказа и Сахалинской области, составленных в ИФЗ РАН при участии специалистов из этих регионов и принятых Госстроем России, соответственно, в 1994 и 1995 гг. Кроме того, при участии некоторых проектно-изыскательских организаций (ПНИИС Гос-

строю России, НИИ «Гидропроект» и др.) в связи с насущными задачами были внесены уточнения и в эти ВС для нескольких конкретных пунктов Российской Федерации (г. Грозный, Зейская ГЭС, г. Оха и др.). Все временные схемы, как и утвержденная ранее, в 1987 г., ВС-87 сейсмического районирования территории Восточно-Европейской платформы, составленная для особо ответственных объектов в НИИ «Гидропроект», а также сама карта ОСР-78, должны прекратить свои нормативные действия с вводом комплекта новых карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97, созданного к концу 1997 г. в ОИФЗ РАН. Аналогичные корректировки карты ОСР-78 после упомянутых выше сильных землетрясений были осуществлены и в бывших союзных республиках.

Как показали исследования, карта образца 1978 года (ОСР-78) на самом деле и не была «общей», поскольку составлялась фрагментарно в разных регионах и в республиках, по разнотипной методике и на основе разрозненного сейсмологического и сейсмогеологического материала. Среди других недостатков карты ОСР-78, о которых будет сказано ниже, главным было отсутствие какого-либо описания используемой составителями этой карты общей методики и исходных данных. В связи с этим оказалось невозможным проверить и повторить те или иные прежние построения. Поэтому наши исследования по ОСР-97 были начаты в 1991 году фактически «с чистого листа».

Практически все предыдущие карты ОСР (1937, 1957, 1968 гг.) были детерминистскими и не учитывали основные характеристики сейсмического режима сейсмоактивных территорий, хотя еще в середине 40-х годов С.В. Медведев [14] предложил ввести в зоны сейсмической опасности внутреннюю дифференциацию в соответствии с периодом повторяемости сильных землетрясений и с предполагаемыми сроками службы различных типов сооружений. Однако даже карта 1978 года, в которую впервые были введены некие вероятностные характеристики повторяемости сотрясений, на самом деле не давала адекватных оценок сейсмической опасности. Индексы 1, 2 и 3 возле номиналов в зонах балльности на одной и той же карте, якобы отражающие повторяемость сейсмических сотрясений один раз в 100, 1000 и 10000 лет, явились одной из причин низкой надежности карты ОСР-78. В результате введенной индексации на карте 1978 г. вместо трех традиционных зон балльности (7, 8 и 9) появилось десять – 7₁, 7₂, 7₃, 8₁, 8₂, 8₃, 9₁, 9₂, 9₃ и 9* (т.е. более 9 баллов), некорректно полученных сейсмологами и неадекватно используемых проектировщиками в СНиП-П-7-81. Как показали последующие исследования, в результате такой индексации реальный инженерный риск, определяемый картой ОСР-78, оказался не единым для всех сейсмоопасных районов страны [9, 51].

Идеи сбалансированного риска, повторяемости сотрясений («сейсмическая сотрясаемость») и оценки вероятности превышения возможной интенсивности, хотя и были впервые предложены отечественными сейсмологами [14, 22], получили наибольшее развитие за рубежом, благодаря известной публикации К.А. Корнелла в 1968 г. [56], и привели западные страны к построению карт сейсмического районирования в терминах вероятности превышения (или не превышения) сейсмической опасности в заданные интервалы времени. Такой подход в свое время был одобрен и составителями карты ОСР-78 [28], но (как и многие другие интересные разработки отечественных сейсмологов тех лет) по целому ряду объективных и субъективных причин не был применен на практике, за исключением двух территорий – Узбекистана и Камчатки.

В последние годы идеи вероятностно-детерминированного прогнозирования опасных сейсмических и других геологических процессов начали все активнее внедряться в сейсмологию и в практику строительства в нашей стране [10, 36, 39 и др.]. С учетом выявленных недостатков карты ОСР-78, на основе новейших достижений и результатов собственных исследований, нами было принято решение создать не одну карту с различными индексами, как это было сделано составителями карты ОСР-78, а комплект нормативных карт Общего сейс-

мического районирования территории Российской Федерации, предназначенных для строительных объектов разных категорий ответственности и сроков службы и отражающих равновероятную для конкретного уровня риска расчетную интенсивность сотрясений. Исследования проводились в 1991-1997 гг. по проблеме «Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии» (руководитель В.И.Уломов), разрабатываемой в ОИФЗ РАН (Генеральный директор В.Н.Страхов) в рамках Государственной научно-технической программы России «Глобальные изменения природной среды и климата» и (руководитель вице-президент РАН Н.П.Лаверов) явились продолжением работ по сейсмическому районированию территории бывшего СССР, однако выполнялись на ином концептуальном, методологическом, технологическом и научно-организационном уровне [28, 29,36, 39].

В основу наших исследований положено учение о сейсмогеодинамике (СГД), рассматривающей сейсмичность как результат деформирования земной коры и всей литосферы с учетом фрактальных особенностей их слоисто-блоковой структуры, прочностных свойств и процессов разрушения на разных иерархических масштабных уровнях [32 – 38, 46]. В результате была разработана целостная методология (рис.2), созданы однородные сейсмологические и геолого-геофизические электронные базы данных для всей обширной территории Северной Евразии, охватывающей Россию и другие страны СНГ, а также сопредельные сейсмоактивные регионы. Создана основополагающая единая модель зон возникновения очагов землетрясений с адекватной их сейсмологической параметризацией [46, 47]. Во всех расчетах и построениях участвовали не точечные, как прежде, а протяженные очаги землетрясений, и использовались новейшие представления о нелинейном проявлении сейсмогеодинамических процессов (нелинейное деформирование фрактальных структур, нелинейность пространственно-временного и энергетического распределения землетрясений, нелинейные синергетические явления, затухание сейсмических сотрясений и др.).



Рис. 2. Методология сейсмического районирования [39, 46]. На основе трех блоков банка данных (геодинамика, сейсмичность и сильные движения грунта) формируются две модели – очаговых зон (МОЗ) и сейсмического эффекта (МСЭ), на основе которых ведется расчет сейсмической опасности и составляются карты сейсмического районирования.

Впервые сейсмическим районированием была охвачена вся территория Северной Евразии, включая равнинные территории и шельфы окраинных и внутренних морей. В решении практически всех задач ОСП-97 применены вероятностные и вероятностно-детерминированные характеристики, учитывающие как случайные, так и закономерные факторы сейсмогенеза, а также разного рода неопределенности в исходных и выходных данных. Все построения осуществлены в электронном виде в современной технологии Географических информационных систем (GIS ESRI).

Создан комплект из трех вероятностных карт общего сейсмического районирования (ОСП-97-А, ОСП-97-В, ОСП-97-С) территории Северной Евразии, отражающих различную степень сейсмической опасности в баллах шкалы MSK-64 [31, 47, 48]. Карта ОСП-97-А, представленная в пиковых ускорениях колебаний грунта (PGA), вошла составной частью в готовящуюся к изданию под эгидой ООН мировую карту глобальной сейсмической опасности (Global Seismic Hazard Assessment Program – GSHAP) [41, 57].

Новая методология разработки и практического использования Комплекта новых карт ОСП-97 одобрены решением расширенного заседания Ученого совета ОИФЗ РАН (12 февраля 1998 г.), утверждены Вице-президентом РАН (23 марта 1998 г.) и Заместителем министра строительства РФ (28 марта 1998 г.), постановлениями НТС Минстроя России (21 апреля 1998 г.), Бюро Отделением геологии, геофизики, геохимии и горных наук РАН (20 мая 1998 г.) и приняты в качестве основы для нормативных документов, позволяющих оценивать степень сейсмической опасности для строительных объектов разных категорий ответственности и сроков службы [31].

СЕЙСМОГЕОДИНАМИКА СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Глобальная упорядоченность сейсмоактивных регионов.

Уже давно стало очевидным, что районирование сейсмической опасности, основанное исключительно на сведениях о произошедших землетрясениях, без разработки адекватных прогностических сейсмогеодинамических моделей (СГД-модели), абсолютно бесперспективно [1-6].

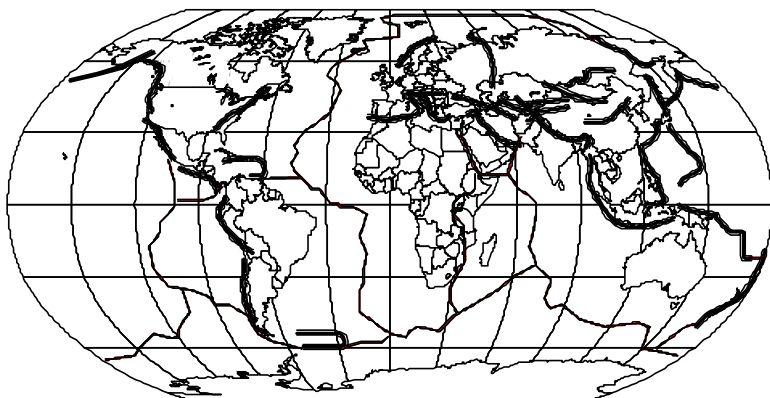


Рис. 3. Глобальная упорядоченность сейсмогенерирующих региональных структур: жирные линии – оси конвергентных зон субдукции и их реликтов на континентах; тонкие линии - оси дивергентных рифтовых зон.

Структурные и геодинамические закономерности, свойственные обширной территории

Северной Евразии, позволяют рассматривать ее как планетарную СГД-систему. Эти закономерности ярко выражены в иерархической гетерогенности современных тектонических структур, начиная с литосферы и кончая блоками земной коры различного ранга, а также в направленности их геодинамического развития. Связь региональной сейсмичности со структурой и динамикой литосферы наиболее ярко выражена в глобальных масштабах тремя основными типами СГД-взаимодействий, обусловленных дивергенцией, конвергенцией и трансформными перемещениями литосферных плит.

Наиболее активными в сейсмическом отношении являются конвергентные структуры литосферы. Они достаточно упорядочены по своим размерам и представлены дугообразными границами между литосферными плитами, расположенными по периферии океанов в виде зон субдукции, а также их реликтами на континентах (рис. 3). Размеры океанических, а следовательно, и континентальных дуговых структур обусловлены кривизной земной сферы, а также толщиной, прочностными свойствами и интенсивностью геодинамического взаимодействия литосферных плит. Среднестатистическая протяженность всех конвергентных регионов мира составляет 3000 ± 500 км. Соизмеримой с этой величиной оказались и преимущественные расстояния между центрами ближайших друг к другу пар регионов. Как выяснилось, размеры этих сейсмоактивных областей и их пространственное распределение имеют самое непосредственное отношение к оценке величины магнитуд максимальных возможных в их пределах землетрясений [37].

Каждый из таких регионов характеризуется своим сейсмическим режимом и свойственной ему структурой сейсмичности. Поэтому, как будет показано ниже, именно регион указанных выше размеров (3000 ± 500 км) принят за «исходную» сейсмогенерирующую структурную единицу при разработке модели зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ). Обнаруженные закономерности явились основой и для адекватной сейсмической регионализации Северной Евразии (см. рис.4).

Сейсмичность и сейсмический режим регионов Северной Евразии.

Сейсмичность Северной Евразии обусловлена интенсивным СГД-взаимодействием нескольких крупных литосферных плит – Европейской, Азиатской, Аравийской, Иранской, Индийской, Китайской, Тихоокеанской, Охотской и Северо-Американской (рис. 4).

С геологической точки зрения, рассматриваемая территория включает в себя четыре крупные платформы разного возраста с относительно низкой и рассеянной сейсмичностью (Восточно-Европейская, Западно-Сибирская, Туранская и Сибирская) и ряд орогенических регионов с чрезвычайно высокой сейсмической активностью (Иран-Кавказ-Анатолийский, Центрально-Азиатский, Алтай-Саяно-Байкальский, Курило-Камчатский и др.). Курило-Камчатская зона субдукции с глубиной гипоцентров, превышающей 600 км, является наиболее подвижным и сейсмически активным регионом Северной Евразии. Здесь возникают наиболее крупные землетрясения и высвобождается основная доля СГД-деформаций и сейсмической энергии на рассматриваемой территории.

Очаги с промежуточной глубиной залегания (соответственно, до 200 и 300 км) свойственны двум другим хорошо выраженным реликтовым зонам субдукции – зоне Вранча в Восточных Карпатах и Памиро-Гиндукушу – в Центральной Азии. Преобладающее число внутрикоровых очагов расположено в верхней части земной коры, на глубинах до 15 км. Распределение по глубине их гипоцентров обусловлено иерархической структурой среды, размерами L_M и вертикальной протяженностью H_M самих очагов, связанными с величиной магнитуды M соответствующих землетрясений.

На рис. 5 приведены графики среднегодовой скорости потока V_{RM} (т.е. числа N_M землетрясений в год) сейсмических событий с $M \geq 4.0$ в восьми основных сейсмоактивных регионах Северной Евразии (см. также Табл. 1). При этом среднегодовая сейсмическая активность не нормирована на единицу площади, а характеризует каждый из регионов в целом. Во всех случаях значения активности относятся к интервалам $\Delta M = \pm 0.2$ с шагом в 0.5 единицы магнитуды M , которая всюду (если это не оговорено) соответствует M_{LH} . Выше всех расположен график для Курило-Камчатского региона, на втором месте - Центральная Азия, далее следует Иран-Кавказ-Анатолийский регион. Наименьшей активностью из приведенных на этом рисунке регионов характеризуется Чукотский.

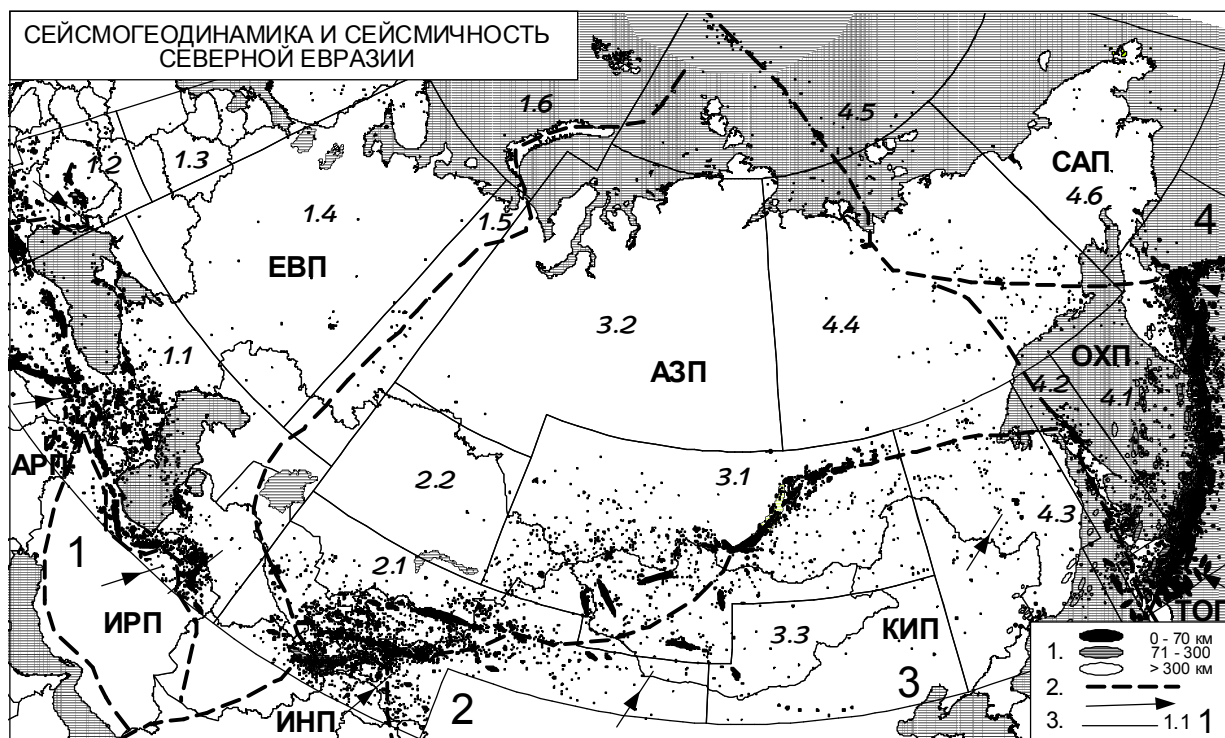


Рис. 4. Сейсмичность и сейсмогеодинамическая регионализация Северной Евразии:

1 – очаги землетрясений разных магнитуд (с $M \geq 5.0$ с древнейших времен по 1995 г. и с $M \geq 3.5$ – с 1960 по 1991 г.) и глубин залегания гипоцентров ($h \leq 70$; $70 < h \leq 300$; $h > 300$ км); 2 – условные границы и направление (стрелки) перемещения литосферных плит (ЕВП – Европейская, АЗП – Азиатская, АРП – Аравийская, ИРП – Иранская, ИНП – Индийская, КИП – Китайская, ТОП – Тихоокеанская, ОХП – Охотская, САП – Северо-Американская); 3 – условные границы и номера сейсмоактивных регионов и сегментов:

Сегменты: 1 — Восточно-Европейский; 2 — Центрально-Азиатский; 3 — Центрально-Сибирский; 4 — Восточно-Азиатский.

Регионы: 1.1 — Иран-Кавказ-Анатолийский; 1.2 — Карпато-Балканский; 1.3 — Прибалтийский; 1.4 — Восточно-Европейский; 1.5 — Уральский; 1.6 — Новоземельский; 2.1 — Памиро-Тянь-Шаньский; 2.2 — Центрально-Казахстанский; 3.1 — Алтай-Саяно-Байкальский; 3.2 — Западно-Сибирский; 3.3 — Восточно-Монгольский; 4.1 — Курило-Камчатский; 4.2 — Сахалино-Японский; 4.3 — Приамуро-Приморский; 4.4 — Верхоянский; 4.5 — Североземельский; 4.6 — Чукотский.

Рис. 5 (справа) иллюстрирует среднегодовой поток сейсмических событий на всей Земле раздельно по годам (с 1987 по 1996 г.) в сравнении с суммарным среднегодовым сейсмическим режимом всех регионов Северной Евразии. И здесь параллельность графиков наблюдается лишь в интервале магнитуд умеренных землетрясений – $5.0 \leq M \leq 6.0$. Заметное снижение на графиках уровня сейсмической активности землетрясений с $M < 5.0$ (левый загиб графика) обусловлено их частичным пропуском из-за невысокой чувствительности и редкой сети сейсмических станций на каждой из рассматриваемых территорий.

Существенный разброс величин среднегодового глобального потока сейсмических событий с $M \geq 6.5$, с одной стороны, свидетельствует о недостаточном времени наблюдений над крупными землетрясениями мира, а с другой, – о неправомерности прямолинейной (экспоненциальной) экстраполяции графиков вправо и в этом случае.

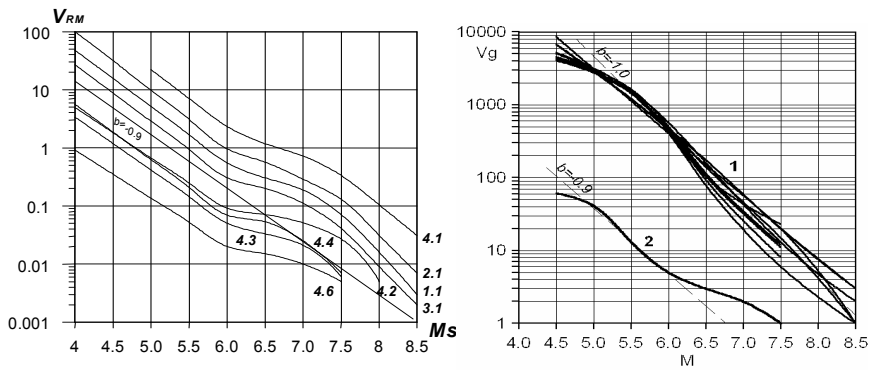


Рис. 5. Сейсмический режим V_{RM} основных регионов Северной Евразии (слева) и сейсмическая активность V_g Земли в целом: 1.1 ÷ 4.6 - номера регионов; 1 - графики повторяемости землетрясений на земном шаре по годам за 10 лет - с 1987 по 1996 гг.; 2 - среднегодовая сейсмическая активность всей территории Северной Евразии.

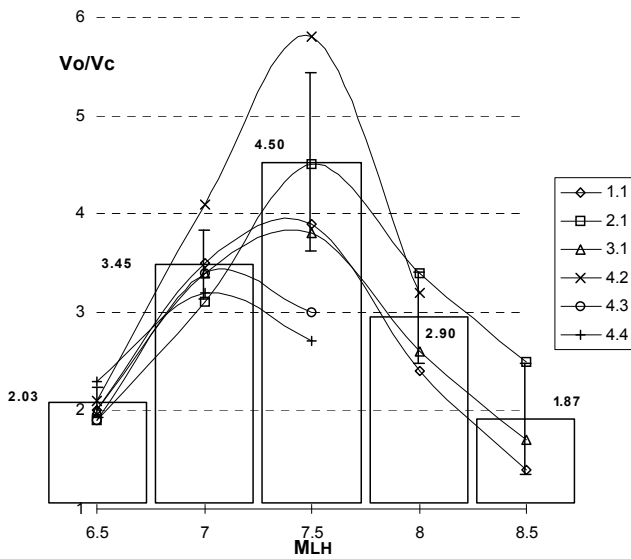


Рис.6. Превышение наблюдаемой V_o среднегодовой скорости потока сейсмических событий с $M \geq 6.5$ в основных регионах Северной Евразии над вычисленной V_c по экспоненте, свойственной повторяемости событий с $4.0 \leq M \leq 6.0$ и соответствующей уравнению $\log V = \log M_o - b(M - M_o)$, где $M_o = 4.0$:

1.1 - Иран-Кавказ-Анатолийский:

$$\log V = 1.676 - 0.970 (M - 4.0)$$

2.1 - Центрально-Азиатский:

$$\log V = 2.002 - 1.011 (M - 4.0)$$

3.1 - Алтай-Саяно-Байкальский:

$$\log V = 1.423 - 0.970 (M - 4.0)$$

4.2 - Сахалино-Японский:

$$\log V = 0.686 - 0.863 (M - 4.0)$$

4.3 - Приамуро-Приморский:

$$\log V = 0.526 - 0.913 (M - 4.0)$$

4.4 - Верхоянский:

$$\log V = 0.742 - 0.951 (M - 4.0)$$

Кривые 1.1 ÷ 4.4 - сглаженные прогнозные величины V_o/V_c для каждого из этих регионов; гистограмма и вертикальные отрезки - средние для всех регионов интервальные значения V_o/V_c и их стандартные отклонения. Уравнения экспоненциального участка $4.0 \leq M \leq 6.0$ графиков V отнесены к площади соответствующего региона, в пределах которой плотность эпицентров землетрясений не менее трех на 10 тыс. км².

Весьма значительный, на первый взгляд, прогиб вверх правой части сводного графика повторяемости таких же землетрясений в Северной Евразии в какой-то мере обусловлен нашим выбором при его построении не средних, а пороговых значений стандартных отклонений параметров активности наиболее крупных землетрясений, с целью большей уверенности в оценке сейсмической опасности рассматриваемой территории (рис. 6). Вместе с тем, амплитуда этого прогиба вполне сопоставима с величиной разброса параметров на аналогичном участке графика глобальной активности (рис. 5б). Это еще раз подтверждает правомерность принятой нами нелинейной модели долговременного сейсмического режима.

Как видно, все графики не линейны. Прямолинейный участок графиков с углом наклона, близким к $b = -0.9$, свойственен лишь интервалу магнитуд $4.0 \leq M \leq 6.0$ (см. уравнения в подписи к рис. 6). Начиная же с $M \geq 6.5$, все без исключения графики прогибаются кверху, что

указывает на более высокую повторяемость таких землетрясений, чем это следовало бы из традиционной линейной экстраполяции левой части графиков вправо.

Как выясняется, реальная частота возникновения крупных землетрясений в три и более раз выше, чем это считалось прежде. Использование прямолинейных графиков в прошлые годы приводило к существенному завышению периода повторяемости крупных землетрясений и тем самым – к занижению сейсмической опасности практически во всех регионах бывшего СССР.

Представление о сейсмическом режиме регионов Северной Евразии дает таблица 1, в которой наряду с высокоактивными регионами приведены данные по территории российской части Восточно-Европейской платформы (совместно регионы 1.4 и 1.5). Здесь T_M (сутки, месяцы, годы) – периоды повторяемости землетрясений различных магнитуд M и интенсивности I_0 (баллы) в эпицентральных зонах основных регионов Северной Евразии (см. рис.4).

Таблица 1

Величина Землетрясений		Средний период повторяемости T_M (с –сутки, м - месяцы, остальное- годы) Землетрясений разной величины в регионах Северной Евразии								
M	I_0	1.1	2.1	3.1	4.1	4.2	4.3	4.4	4.6	1.4+1.5
4	V-VI	7 с	3-4 с	14-15 с	2-3 с	2 м	4 м	2 м	1	4
4.5	VI-VII	22 с	10-11 с	1-2 м	5-7 с	7 м	10 м	6 м	3	10
5	VII-VIII	2 м	1 м	4 м	20 с	2	2	2	7	20
5.5	VIII	7 м	3-4 м	1	2 м	4	7	5	20	50
6	VIII-IX	2	1	3	5 м	10	20	15	50	100
6.5	IX	3	2	5	1	15	30	20	70	250
7	IX-X	5	4	10	2	20	50	40	100	550
7.5	X	14	8	30	3	40	170	140	200	-
8	X-XI	60	30	100	10	200	-	-	-	-
8.5	>XI	330	140	500	30	-	-	-	-	-

Фрактальная решеточная модель сейсмогенеза.

Землетрясения возникают в дискретной слоисто-блоковой среде, структура которой предопределена предыдущими геологическими эпохами, а в конечном итоге – новейшей и современной геодинамикой. Очаги землетрясений не рассеяны хаотично, а приурочены к относительно узким линейamentным зонам активных разломов. Размеры разломов и расстояния между ними, в свою очередь, обусловлены толщиной и прочностными свойствами соответствующих слоев, подвергшихся в прежние геологические эпохи разломообразованию.

Чем толще слой, расчлененный разломами на блоки, тем глубиннее и протяженнее сами разломы, тем крупнее образованные ими блоки и мощнее приуроченные к ним очаги землетрясений. И наоборот, с уменьшением толщины слоев уменьшаются размеры соответствующих разломов, геоблоков и сейсмических очагов. Было обнаружено, что расстояния δ_j между дислокационными узлами пересекающихся разломов и, соответственно, размеры геоблоков имеют ярко выраженную тенденцию группироваться по рангам, примерно удваивая от ранга к рангу свои размеры в плане и по глубине [34, 37]. Природа этого явления, скорее всего, обязана регулярности удвоения глубины залегания основных границ раздела в земной коре и верхней мантии, которых и достигают разломы соответствующих рангов. Так, кровля «гранитного» слоя на континентах в среднем залегает на глубине около 10 км, граница Конрада – на 20-25 км, подошва земной коры – на 40-50 км, подошва литосферы – ≈ 100 км, астеносферы – ≈ 200 км, далее следуют границы на глубинах около 400 и 700 км. Как выясняется, этой фундаментальной закономерности скачкообразного изменения физических свойств вещества с удвоением глубины его залегания подчинены все геологические горизонты, вплоть до земной поверхности, включая речные террасы и даже почвы [34, 37].

Выявленная упорядоченность диктует регулярность не только в системах тектонических разломов и геоблоков, но и в иерархии очагов землетрясений: чем крупнее землетрясения, тем дальше друг от друга расположены их очаги. Так, очаги землетрясений, ранжированные по интервалам магнитуд M и излучаемой ими упругой энергии E , распределены закономерно не только во времени («закон повторяемости землетрясений»), но и в пространстве («закон дистанцирования сейсмических очагов») [34]. Как оказалось, среднестатистические расстояния δ_M (км) между эпицентрами ближайших пар сейсмических очагов размером L_M (км) и магнитуды M хорошо описываются следующими зависимостями:

$$\delta_M = 10^{(0.6M - 1.94)} \quad (1)$$

$$L_M = 10^{(0.6M - 2.5)} \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что величина $\delta_M / L_M = 3.63$ не зависит от магнитуды и по отношению к ней является инвариантом, отражая тем самым самоподобие в иерархии размеров взаимодействующих геоблоков и обусловленных ими очагов землетрясений. Инвариантами по отношению к магнитуде в определенной мере являются и соотношения длины L_M сейсмических очагов с их вертикальной протяженностью H_M , совпадающей с толщиной соответствующих геоблоков h_j .

Зависимости (1) и (2) в энергетической классификации землетрясений в системе СИ, где E измеряется в джоулях, а L_E и δ_E – в метрах, выглядят еще более упорядоченным образом [34, 37]:

$$L_E = 2^{\lg E} / \sqrt{3.5}; \quad \delta_E = 2^{\lg E} \sqrt{3.5}. \quad (3)$$

Величина δ_M (как и δ_E) есть ничто иное, как средний размер δ_j в плане геоблоков, способных генерировать землетрясения соответствующей максимальной возможной магнитуды M_{\max} . Одновременно $\delta_M = \delta_j$ – это диаметр области, ответственной за очень важную для оценки сейсмической опасности величину M_{\max} , связанную с δ_j выражением:

$$M_{\max} = 1.667 \log \delta_j + 3.233. \quad (4)$$

В таблице 2 в числовом выражении приведены средние и интервальные (в скобках) значения соотношений размеров очагов L_M , преимущественных межэпицентральных расстояний δ_M и величины магнитуды землетрясений M (в скобках – интервальные значения).

Таблица 2.

M	L_M , км	δ_M , км
9.0 (8.8-9.2)	800 (600-1000)	2880 (2200-3800)
8.5 (8.3-8.7)	400 (300-600)	1440 (1100-1900)
8.0 (7.8-8.2)	200 (150-260)	720 (550-950)
7.5 (7.3-7.7)	100 (80-130)	360 (280-480)
7.0 (6.8-7.2)	50 (40-65)	180 (140-240)
6.5 (6.3-6.7)	25 (19-33)	90 (70-120)
6.0 (5.8-6.2)	12 (10-17)	46 (35-60)
5.5 (5.3-5.7)	6 (5-8)	23 (17-30)

Взаимосвязь в упорядоченности разломов, геоблоков и сейсмических очагов, а также в развитии сейсмогеодинамических процессов, положена в основу предложенной В.И. Уломовым более десяти лет тому назад обобщенной энерго-пространственно-временной фрактальной решеточной модели (ФРМ) сейсмогенеза (рис. 7) [34]. Эта модель, в отличие от традиционных континуальных, наиболее ярко отражает все многообразие, упорядоченность и единство дискретной структуры геофизической среды и «квантовой» динамики сейсмических процессов [46].

Несмотря на свою абстрактность (а скорее благодаря ей) ФРМ позволяет выявлять и объяснять важные закономерности в структуре и развитии сейсмогеодинамических процессов. Так, согласно ФРМ, диаметр области подготовки землетрясений δ независимо от их магнитуды примерно в 4 раза превышает размер их очага; периодичность возникновения очагов землетрясений разных магнитуд в соответствующих им узлах не зависит от магнитуды; иерархическое множество геоблоков и очагов землетрясений имеют одну и ту же или очень близкую фрактальную размерность; фрактальность слоисто-блоковых структур, в свою очередь, обуславливает их особую реакцию на деформационные воздействия и т.д. Все это и многое другое еще раз указывает на структурно-динамическое единство иерархической геофизической среды и протекающих в ней сейсмогеодинамических процессов.

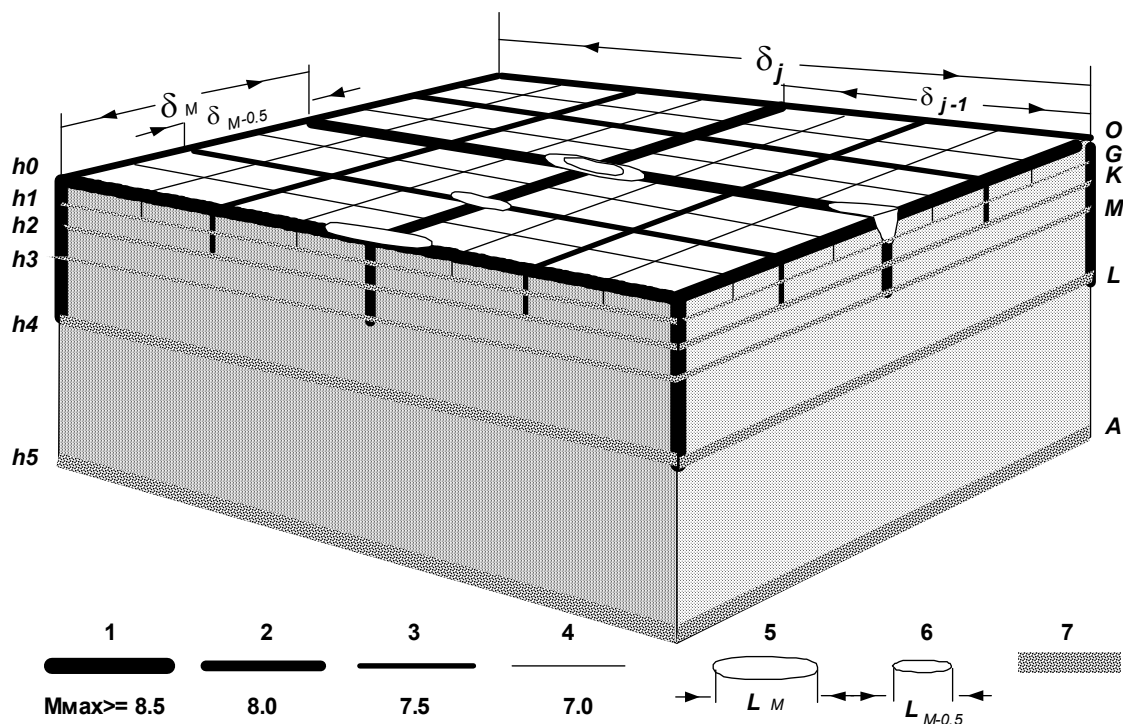


Рис. 7. Фрагмент фрактальной решеточной модели сейсмогеодинамики [34].

1 ÷ 4 – удваивающиеся по ширине (толщине) линеаменты, генерирующие «землетрясения» указанных возле них значений M_{\max} , 5, 6 – сейсмические очаги размерами L_M и $L_{M-0.5}$, соответствующими магнитудам M_{\max} и $M_{\max}-0.5$; 7 – основные границы раздела в земной коре и верхней мантии Земли: О – кровля консолидированной коры, G – кровля «гранитного» слоя, К – граница Конрада, М – граница Мохоровичича, L – подошва литосферы, А – подошва астеносферы; $h_0 \div h_5$ – удваивающаяся условная средняя глубина залегания указанных границ и достигающих их линеаментных структур.

Фрактальность идеализированной структуры литосферы и очаговой сейсмичности, изображенная на рис. 7, обусловлена следующими факторами. Как видно, на каждом шаге иерархической генерации каждый геоблок делится соответствующей горизонтальной границей раздела на две половины, верхняя из которых рассекается двумя ортогонально пересекающимися вертикальными разломами на четыре меньших по размеру блока. Так происходит на всех иерархических масштабных уровнях. Благодаря геометрическому подобию ни одной области масштабов нельзя отдать предпочтение – это главное свойство фракталов.

Аналогичным образом выглядит и генерация очагов землетрясений, параметризованных с шагом в 0.5 единицы магнитуды: каждому очагу с M_{\max} соответствуют четыре очага с $M_{\max}-0.5$, восемь очагов с $M_{\max}-1.0$ и т.д. В обеих генерациях на смену одному событию приходится четыре. И в той, и в другой генерации по мере приближения к земной поверхности размеры геоблоков и очагов землетрясений самоподобно уменьшаются, а частота их появления увеличивается.

Подчиняясь фрактальным свойствам природной среды, геодинамическая активность, обусловленная движением литосферных плит, разломы и блоки земной коры и всей литосферы, а следовательно, и очаги землетрясений непрерывно создают регулярные самоподобные структуры. Оставшиеся между крупными объектами непотревоженные части среды продолжают дробиться подобно канторовому множеству. Число их непрерывно возрастает. Разломы, геоблоки и очаги землетрясений становятся все меньше и мельче, постепенно заполняя все расположенное выше них пространство. Разноранговые разломы покрывают густой сеткой земную поверхность, характеризуясь дробной (фрактальной) размерностью, промежуточной между одномерной линией и двумерной плоскостью, а погружающиеся в земные недра линеаментные структуры разломов дробят земную кору и всю литосферу на блоки, приобретая фрактальную размерность, промежуточную между двумерной поверхностью и трехмерным объемом.

Упорядоченным образом представлена и иерархия солитоноподобных деформационных волн сейсмической активизации – геонов, обеспечивающих динамику взаимодействующих геоблоков и направленность развития синергетических СГД-процессов [38]. Распространяясь вдоль разломов соответствующего ранга (вдоль иерархических связей ФРМ), геоны создают и разрушают разнообразные зацепы, провоцируя тем самым очаги землетрясений соответствующих магнитуд. Поскольку эти геодинамические процессы развиваются в значительной степени независимо на каждом иерархическом масштабном уровне, им свойственна та же фрактальная размерность, что и самой слоисто-блоковой среде и ее сейсмическому режиму.

Как показывают исследования [38], при слабых внешних геодинамических воздействиях сейсмический режим в регионе близок к стационарному и характеризуется возникновением слабых, преимущественно мелкофокусных землетрясений, генерируемых более густой решеткой мелких разломов. При увеличении вынуждающих сил, например, в результате проявления крупных сейсмических или криповых подвижек, СГД-система переходит в качественно новое и более организованное состояние. Начинают «работать» более крупные разломные структуры. На это указывают наблюдаемые во многих регионах мира возникновение упорядоченных изменений сейсмической активности (миграция очагов землетрясений, периодическая сейсмическая активизация, локализация областей сейсмического затишья и т.п.), обусловленные синергетическими явлениями самоорганизации, свойственными многокомпонентным неравновесным иерархическим системам.

Не акцентируя внимание на типе геодинамических подвижек по разломам (сдвиг, надвиг, сброс и т.п.), можно в первом приближении полагать, что все разломы одного и того же ранга в рассматриваемой модели (как и в реальном регионе) «равноправно» реализуют накапливаемые в ее блоках геодинамические напряжения и деформации. Это дает основание при сейсмологической параметризации зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ) распределять поток сейсмических событий соответствующих магнитуд пропорционально горизонтальной и вертикальной протяженности таких разломов, что нами и сделано при создании сейсмогеодинамической модели зон ВОЗ для районирования сейсмической опасности в Северной Евразии.

Конечно, реальная картина расположения и конфигурации разломов и геоблоков, как и распределения самих очагов землетрясений, не столь идеальна и детерминирована, как в

предложенной нами решеточной модели. Не идеальна и сама среда, которой свойственны нелинейность и неоднородность и в которой, наряду с самоорганизацией, развиваются и энтропийные процессы. В частности, геоблоки не обязательно должны быть прямоугольной и тем более квадратной формы, а разломы отвесно проникать в недра. И те, и другие могут иметь более сложную структуру, однако внутренняя сущность от этого не меняется. В принципе, можно ввести решеточную регуляризацию и построить удовлетворительную фрактальную решеточную модель для любой внешне хаотичной системы, обнаружив в ней ту или иную упорядоченность и масштабное подобие.

МОДЕЛЬ ОЧАГОВЫХ ЗОН

Линеаментно-доменно-фокальная модель сейсмических источников.

Идентификация зон возникновения очагов землетрясений и определение параметров их сейсмического режима является самым сложным и наиболее ответственным звеном в исследованиях по сейсмическому районированию, поскольку от этого зависит надежность всех последующих построений [43 – 45].

В основу создания модели зон возникновения очагов землетрясений и сейсмического районирования Северной Евразии положена линеаментно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель зон ВОЗ, разработанная нами в результате исследований описанной выше решеточной регуляризации [34, 46].

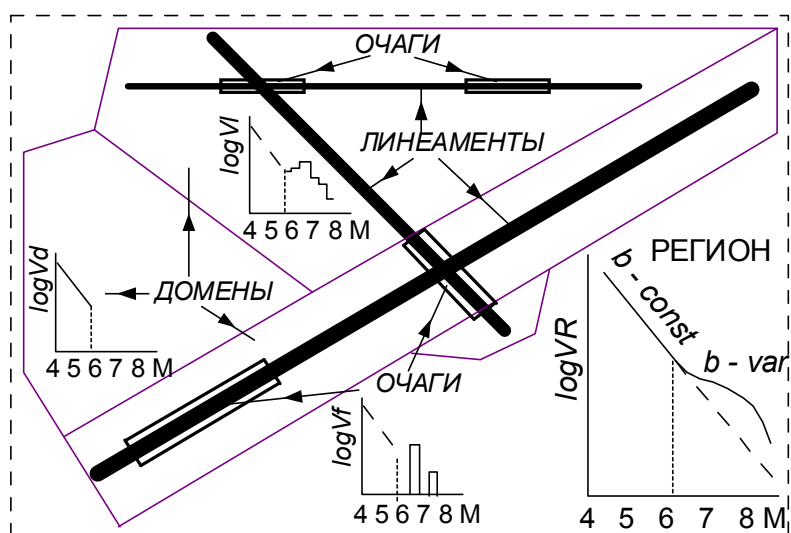


Рис. 8. Основные структурные элементы ЛДФ-модели зон ВОЗ. Приведены графики среднегодовой скорости потока V сейсмических событий во всем регионе (V_{RM}) и в составляющих его структурных элементах – линеаментах (V_l), доменах (V_d) и потенциальных очагах землетрясений (V_f). Показаны интервалы магнитуд, свойственные каждому типу структур.

В соответствии с принятой концепцией, в ЛДФ-модели (рис.8) рассматриваются четыре масштабных уровня: крупный **регион** с его интегральной характеристикой сейсмического режима и три его основных структурных элемента – **линеаменты**, в генерализованном виде представляющие оси верхних кромок трехмерных сейсмоактивных разломных или сдвиговых структур, отражая структурированную сейсмичность и являясь основным каркасом ЛДФ-модели; **домены**, сплошь покрывающие всю территорию, охватывая квазиоднородные в тектоническом и геодинамическом отношении объемы геологической среды, и характеризующиеся рассеянной (диффузной) сейсмичностью; **потенциальные очаги** землетрясений, указывающие на наиболее опасные участки и, как правило, приуроченные к линеаментным структурам. «Движущей силой» в ЛДФ-модели зон ВОЗ остаются выше упомянутые **геоны**, способствующие перемещению крыльев разломов и сдвиговых структур.

Структурные элементы зон ВОЗ (линеаменты – l_m , домены – d_m и потенциальные очаги – f_m), как и землетрясения, классифицируются по M_{max} с шагом 0.5 единицы магнитуды: $M \leq 8.5 \pm 0.2$, $\leq 8.0 \pm 0.2$, $\leq 7.5 \pm 0.2$, $\leq 7.0 \pm 0.2$, $\leq 6.5 \pm 0.2$ и 6.0 ± 0.2 . Знак \leq указывает на то, что каждый из линеаментов с M_{max} (как, впрочем, и доменов) включает в себя и все менее крупные

линеаменты, вплоть до $M=6.0$, поскольку при генерализованном сейсмическом районировании, каким является ОСР, более или менее надежно выделяются линеаменты, генерирующие землетрясения с $M \geq 6.0$. В случае детального сейсмического районирования нижний порог магнитуд может быть понижен.

Верхний порог магнитуды (M_{\max}) определяется реальной сейсмогеодинамической обстановкой, а нижний (M_{\min}) – надежностью регистрации землетрясений с минимальной магнитудой, но представляющих определенную сейсмическую опасность для строительных и других объектов на земной поверхности. В наших исследованиях принято $M_{\min}=4.0$, а сейсмическая интенсивность – $I_{\min}=5$ баллов по шкале MSK-64. Величина M_{\max} оценивается всеми доступными и разумными способами: по размеру древних и современных сейсмодислокаций, ширине зон динамического влияния главных сейсмогенных структур, протяженности и сегментации сейсмоактивных разломов, по размеру взаимодействующих геоблоков, по археологическим и историческим памятникам, по конфигурации графиков повторяемости землетрясений, по экстремальным значениям графика накопления деформаций в сейсмоактивных структурах, по пространственно-временному распределению афтершоков, по местоположению потенциальных очагов землетрясений максимальной магнитуды, распознанных теми или иными способами [21, 34] и т.п.

Согласно ЛДФ-модели, как уже отмечалось, каждый из линеаментов, характеризующийся способностью генерировать землетрясения с M_{\max} , включает в себя и линеаменты меньших рангов, вплоть до $M=6.0$, поскольку вдоль них с определенной дисперсией (см. рис. 9а) происходят и менее крупные сейсмические события. Очаги с $M_{\max} \leq 5.5$, как правило, принадлежат доменам. Потенциальные очаги землетрясений характеризуются конкретной магнитудой, обычно $M_{\max} \geq 7.0$ и чаще всего приурочены к тем или иным линеаментам.

В отличие от доменов, которые покрывают всю исследуемую территорию без просветов и наложений, линеаменты пересекают друг друга, естественным образом создавая решетку и повышенную сейсмическую опасность в ее дислокационных узлах, поскольку вблизи таких узлов сейсмический эффект обуславливается уже активностью не одного, а по меньшей мере двух линеаментов. Линеаменты могут изламываться, образуя сегменты того же ранга. Узлы пересечения и изломов линеаментов, как известно, представляют наибольшую сейсмическую опасность и по другим причинам: именно в них чаще всего образуются зацепы, вокруг них в геоблоках накапливаются и сбрасываются большие порции упругих напряжений. Поскольку реальные очаги не располагаются строго вдоль осей линеаментов, а отклоняются от них определенным образом в разные стороны, нами получены среднестатистические значения таких отклонений. Это позволило наилучшим образом приблизить идеализированные модели к реальным природным условиям. Рис. 9а иллюстрирует отклонения D_m (км) сейсмических очагов от осей линеаментов в горизонтальном направлении в зависимости от магнитуды M генерируемых ими землетрясений: чем меньше магнитуда землетрясений, тем дальше от оси линеамента могут отклоняться их очаги. Такое рассеяние очагов обусловлено размером областей динамического влияния линеаментных структур на прилегающую среду. С другой стороны, широкий диапазон отклонений D очагов землетрясений с $M=6.0$ от осей всех линеаментов обеспечивает достаточно плавный переход от структурированной сейсмичности линеаментов к рассеянной сейсмичности доменов, что делает картину виртуальной сейсмичности более реалистичной.

На рис. 9б в виде смещенных по вертикали эллипсов показаны возможные флуктуации по глубине местоположения очагов внутрикоровых землетрясений разных магнитуд. Согласно принятой модели, верхние кромки очагов достигают (но не выходят за пределы) кровли консолидированной коры. Интервал глубин для таких флуктуаций был выбран опытным путем равным 5 км, хотя сами очаги и их гипоцентры более значительно меняют свое положение по глубине, поскольку глубина залегания кровли консолидированной коры суще-

ственно меняется в пределах регионов, а сами очаги имеют различную вертикальную протяженность. Наряду с положением плоскости очагов, близким к вертикальному (интервал $90^0 \pm 20^0$), свойственным сдвиговым структурам, в расчетах для надвигов и сбросов использовались и два других интервала углов падения – $45^0 \pm 20^0$ и $135^0 \pm 20^0$. Как видно на гистограмме, изображенной справа, преобладающее число гипоцентров (главным образом, слабых землетрясений) расположено на глубинах до 10-15 км.

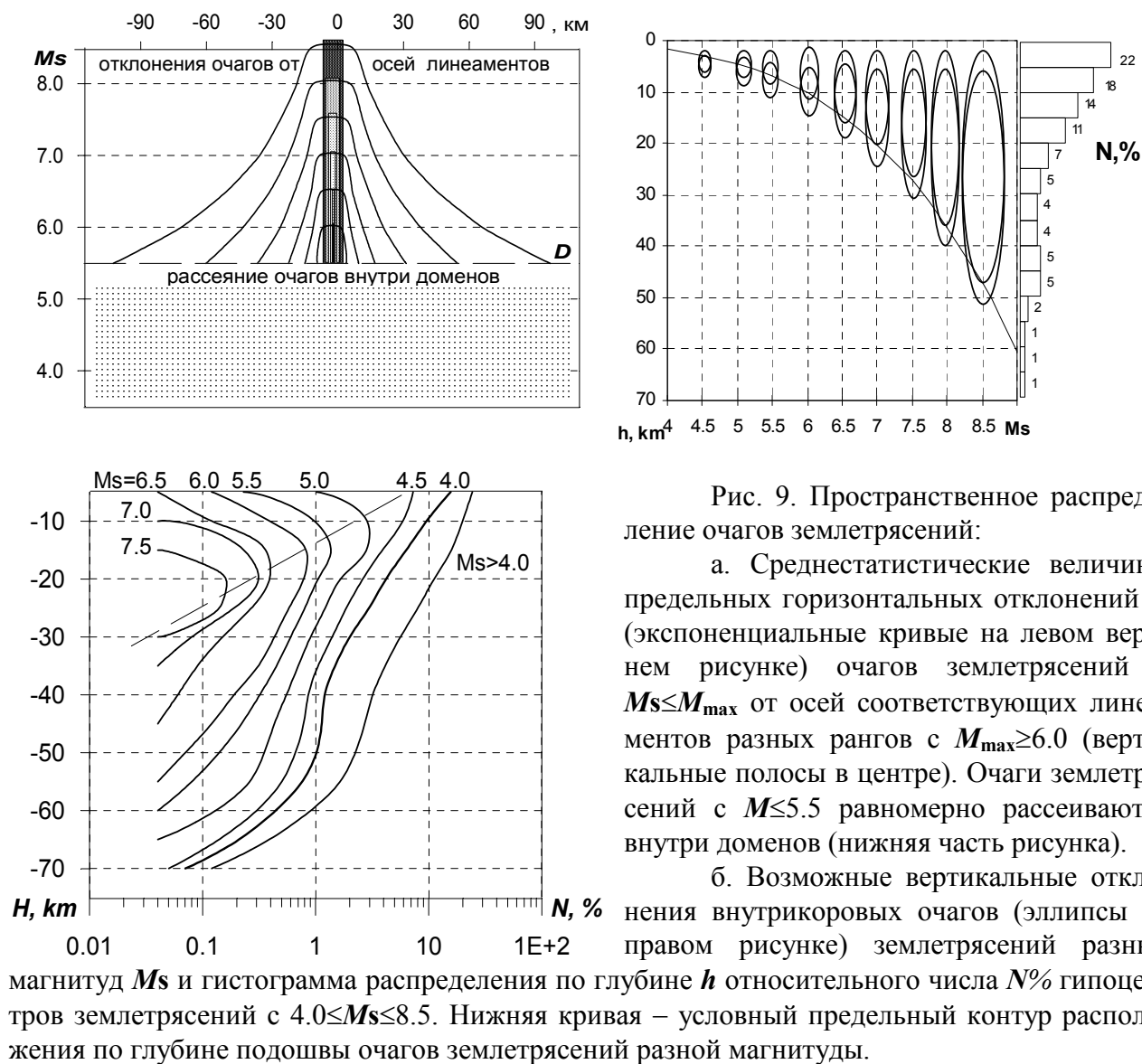


Рис. 9. Пространственное распределение очагов землетрясений:

а. Среднестатистические величины предельных горизонтальных отклонений D (экспоненциальные кривые на левом верхнем рисунке) очагов землетрясений с $M_s \leq M_{\max}$ от осей соответствующих линеаментов разных рангов с $M_{\max} \geq 6.0$ (вертикальные полосы в центре). Очаги землетрясений с $M \leq 5.5$ равномерно рассеиваются внутри доменов (нижняя часть рисунка).

б. Возможные вертикальные отклонения внутрикоровых очагов (эллипсы на правом рисунке) землетрясений разных магнитуд M_s и гистограмма распределения по глубине h относительного числа $N\%$ гипоцентров землетрясений с $4.0 \leq M_s \leq 8.5$. Нижняя кривая – условный предельный контур расположения по глубине подошвы очагов землетрясений разной магнитуды.

с. Распределение по глубине H (км) относительного числа N_M (%) гипоцентров землетрясений отдельно по интервалам магнитуд $\Delta M_s \pm 0.2$ (нижний рисунок). Пунктиром показан тренд увеличения глубины максимальных значений N_M с ростом магнитуды.

Все полученные характеристики сейсмического режима и дисперсии сейсмических очагов использованы в дальнейшем при моделировании прогнозной (виртуальной) сейсмичности, в расчете сейсмической сотрясаемости и сейсмическом районировании.

Идентифицируя сейсмогенные структуры с линеаменами, мы продолжаем прогрессивные традиции российской школы сейсмогеологов, заложенные в конце прошлого века И.В.Мушкетовым и А.П.Орловым [17, 18] и развитие в середине этого столетия И.Е.Губиным [6] и другими отечественными учеными. Распространенные же до сих пор на западе представ-

ления о сейсмоактивных структурах лишь как о площадных «квазиоднородных сеймотектонических провинциях» («домены», в нашей терминологии) с их «рассеянной» сейсмичностью менее реалистичны как с геотектонической, так и с сейсмологической точек зрения. Вместе с тем, как уже отмечалось, хотя «рассеянной» сейсмичности в природе практически не существует, из-за неполноты наших знаний тонкой структуры сейсмоактивной среды, этим подходом и доменной оставляющей модели ЛДФ приходится пользоваться. Наиболее же рационально это делать, конструируя гибридную линеаментно-доменную модель очаговых зон землетрясений, что и выполнено нами в работе по ОСР-97. Целиком же заменять при сейсмическом районировании линеаменты больших магнитуд площадными доменами недопустимо не только из физических соображений, но и неоправданно по следующим причинам:

– уменьшение площадей доменов безотносительно к размерам областей, ответственных за крупные землетрясения, приводит к завышению периода повторяемости таких сейсмических событий и, следовательно, к занижению сейсмической опасности и ошибкам типа «пропуска цели» на картах сейсмического районирования;

– чрезмерное же увеличение площадей доменов, в пределах которых возможны землетрясения с высокой магнитудой, приводит к «размазыванию» картины сейсмической опасности и, соответственно, к ошибкам типа «ложная тревога».

Линеаментно-доменно-фокальная модель зон ВОЗ лишена этих недостатков и адекватно учитывает особенности распределения очагов землетрясений различных магнитуд. Другим нашим нововведением, как уже отмечалось, явилось практическое использование для расчетов и картирования сейсмической опасности не точечных, а протяженных очагов землетрясений, адекватных реальным природным условиям.

Модель зон возникновения очагов землетрясений Северной Евразии.

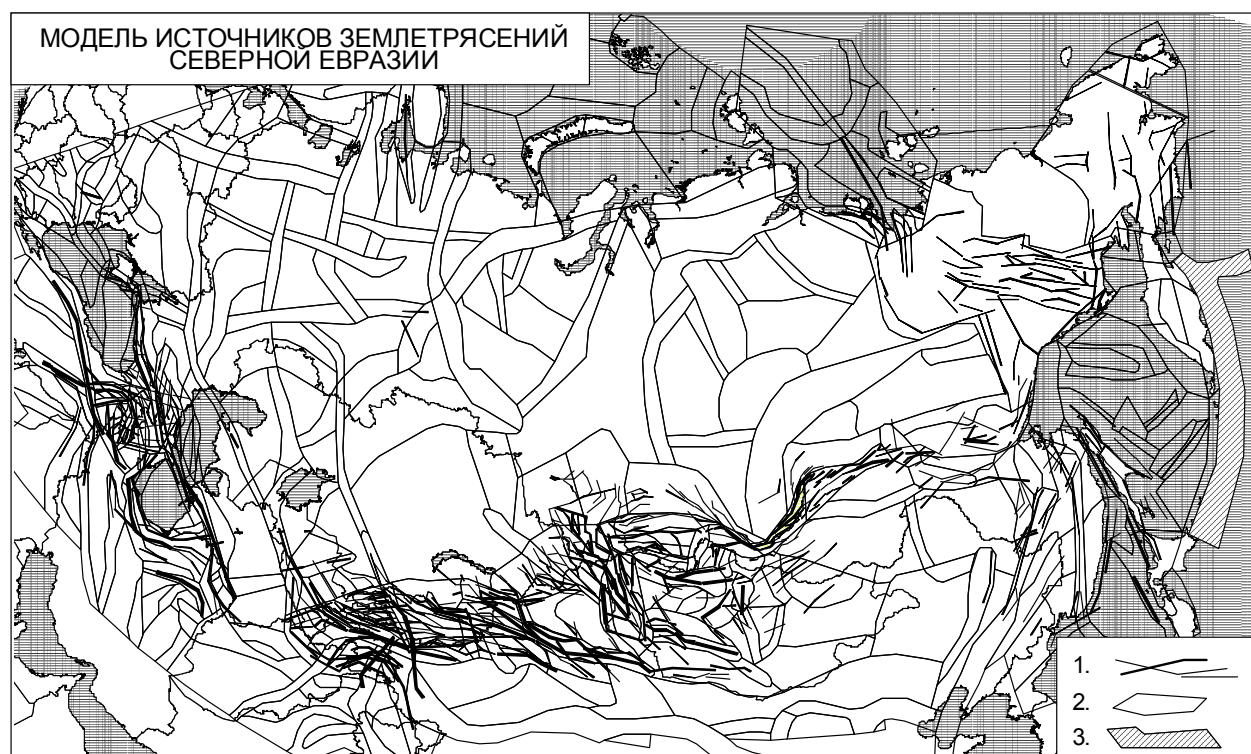


Рис.10 Модель зон возникновения очагов землетрясений Северной Евразии:

1 – сейсмолинеаменты, генерирующие землетрясения с $M \geq 6.0$ (толщина линеаментов пропорциональна магнитуде M_{\max}); 2 – домены, характеризующиеся рассеянными очагами землетрясений с $M \leq 5.5$; 3 – объемная фокальная зона Курило-Камчатских землетрясений.

На рис. 10 приведена ЛДФ-модель зон возникновения очагов землетрясений Северной Евразии. По аналогии с ФРМ, здесь уменьшающейся в 2 раза толщиной линий показаны линеаменты с шагом в 0.5 ± 0.2 единицы магнитуды. С таким же шагом дифференцированы потенциальные очаги землетрясений и домены. Исходной величиной для расчета сейсмического режима основных структурных элементов зон ВОЗ является нормированный на время (в нашем случае – на один год) общий поток сейсмических событий V_{RM} в конкретном регионе (см. рис. 4 и 5). Региональный поток V_{RM} вычисляется на основе каталога землетрясений, очищенного от форшоков, афтершоков и других групповых событий, с учетом периода представительной регистрации в регионе соответствующих сейсмических событий. Для каждого из интервалов магнитуд $\Delta M = \pm 0.2$ определяется средняя долговременная величина V_{RM} , соответствующая среднему ежегодному количеству N_{RM} землетрясений с магнитудой M в регионе R или среднегодовой вероятности $P_{RM(1)}$ возникновения по крайней мере одного такого землетрясения в этом регионе (см. следующие разделы).

Поскольку сейсмический режим каждого структурного элемента зон ВОЗ (l_m, d_m, f_m) обусловлен общим потоком сейсмических событий V_{RM} в соответствующем регионе конфигурация графиков V_l, V_d, V_f в каждой из таких структур будет иметь сходство с соответствующим региональным графиком, изображенным на Рис.5а, а в суммарном виде – абсолютно совпадать с ним («закон сохранения сейсмической энергии региона»):

$$\Sigma V_{lm} + \Sigma V_{dm} + \Sigma V_{fm} = V_{RM}. \quad (5)$$

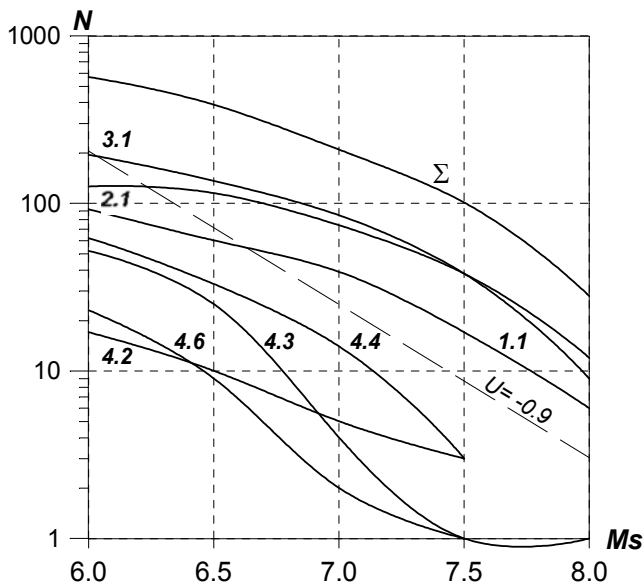
С целью сейсмологической параметризации каждого из линеаментов (в том числе и их сегментов) для каждого из регионов вычисляется суммарная их длина Σl_m , складывающаяся из длин Σl_m всех линеаментов этого и более высоких рангов, поскольку, как уже отмечалось, линеаменты с M_{max} включают в себя и все линеаменты с $M < M_{max}$ вплоть до $M = 6.0$. Затем вычисляется среднегодовая скорость потока V_{lm} событий соответствующей магнитуды M вдоль каждого из линеаментов (в том числе и их сегментов) длиной l_m , как доля V_{RM} – общего потока сейсмических событий такой магнитуды в регионе:

$$V_{lm} = V_{RM} l_m / \Sigma l_m. \quad (6)$$

Например:

$$\begin{aligned} \Sigma l_{6.0} &= \Sigma l_{6.0} + \Sigma l_{6.5} + \Sigma l_{7.0} + \Sigma l_{7.5} + \Sigma l_{8.0} + \Sigma l_{8.5}, & V_{l6.0} &= V_{R6.0} l_{6.0} / \Sigma l_{6.0} \\ \Sigma l_{6.5} &= \Sigma l_{6.5} + \Sigma l_{7.0} + \Sigma l_{7.5} + \Sigma l_{8.0} + \Sigma l_{8.5}, & V_{l6.5} &= V_{R6.5} l_{6.5} / \Sigma l_{6.5} \\ \Sigma l_{7.0} &= \Sigma l_{7.0} + \Sigma l_{7.5} + \Sigma l_{8.0} + \Sigma l_{8.5}, & V_{l7.0} &= V_{R7.0} l_{7.0} / \Sigma l_{7.0} \\ \Sigma l_{7.5} &= \Sigma l_{7.5} + \Sigma l_{8.0} + \Sigma l_{8.5}, & V_{l7.5} &= V_{R7.5} l_{7.5} / \Sigma l_{7.5} \\ \Sigma l_{8.0} &= \Sigma l_{8.0} + \Sigma l_{8.5}, & V_{l8.0} &= V_{R8.0} l_{8.0} / \Sigma l_{8.0} \\ \Sigma l_{8.5} &= \Sigma l_{8.5} & V_{l8.5} &= V_{R8.5} l_{8.5} / \Sigma l_{8.5} \end{aligned} \quad (7)$$

Блок-диаграмма, изображенная на рис. 11 поясняет принцип распределения удельного (среднегодового) потока V_R сейсмических событий разных магнитуд M_{max} региона между его основными структурными элементами – линеаментами ($M_{max} \Rightarrow 6.0$), доменами ($M_{max} \leq 5.5$) и потенциальными очагами землетрясений ($M_{max} \Rightarrow 6.0$). Видно, в частности, что линеаменты более высокого ранга включают в себя также линеаменты меньших магнитуд и тем самым «захватывают» соответствующую долю потока сейсмических событий такой величины. Количество же линеаментов меньших магнитуд складывается из числа этих линеаментов и всех линеаментов большего ранга (принцип кумулятивности).



ной средней величиной угла наклона $b=-0.9$ графиков повторяемости землетрясений. Более того, обе группы кривых на рисунках 5а и 12 в интервале магнитуд $M \geq 6.0$ схожи по своей конфигурации, что еще раз подтверждает правомочность развиваемой нами концепции о нелинейности графиков повторяемости землетрясений и о структурно-динамическом единстве геофизической среды и развивающихся в ней сейсмических процессов, а следовательно, и реалистичность ЛДФ-модели.

Рис.12. Графики распределения кумулятивного числа линеаментов N разного ранга $M_s = M_{\max}$ на территории Северной Евразии (Σ) и в основных сейсмоактивных регионах 1.1 ÷ 4.6 (см. рис. 4). Кумулятивность графиков обусловлена объединением в одно множество всех линеаментов с магнитудами $M \leq M_{\max}$. Пунктиром показана осредненная величина $U=-0.9$, характеризующая фрактальную размерность всего множества линеаментов.

Виртуальная сейсмичность.

На рис. 13а, в качестве примера, показана прогнозная сейсмичность Иран-Кавказ-Анатолийского региона, полученная путем «разыгрывания» виртуальных очагов землетрясений из протяженного по времени модельного каталога, созданного в соответствии с ЛДФ-моделью зон ВОЗ Северной Евразии и их долговременным средним сейсмическим режимом. Алгоритмы построения карт виртуальной сейсмичности разработаны А.А.Гусевым и В.М.Павловым, при участии Л.С.Шумиловой и В.И.Уломова, и подробно описаны в следующем разделе.

На этой карте, в качестве примера, приведена одна случайная выборка для 100-летнего интервала времени. Обычно число выборок достигает многих десятков, а интервал времени зависит от уровня заданной вероятности превышения (или не превышения) ожидаемой сейсмической опасности (см. ниже). Виртуальные сейсмические очаги изображены в виде прямоугольников, размеры которых соответствуют моментной магнитуде M_w «разыгрываемых» землетрясений, вычисляемой по корреляционным зависимостям или на основе определения сейсмического момента. Расположение очагов относительно осей линеаментов и внутри доменов согласовано с изображенными на рис. 9 соотношениями и данными о глубине залегания кровли консолидированной земной коры, а их ориентация в пространстве – с азимутами простирания и направлением падения плоскостей соответствующих линеаментов.

На рис. 13б для сравнения приведена реальная сейсмичность этого же региона. Наблюдаемое сходство обеих карт свидетельствует о реалистичности принятой ЛДФ-модели зон ВОЗ.

На заключительной стадии работ по оценке сейсмической опасности, как показано в следующем разделе, сейсмический эффект на земной поверхности вычислялся от каждого виртуального очага в отдельности с учетом его размеров и закона затухания сейсмических сотрясений с расстоянием. Расчеты производились для каждого узла квадратной сетки, покрывающей с шагом 25 км x 25 км всю территорию Северной Евразии. Всего в расчете участвовало около 100 тысяч узлов, для каждого из которых составлялись гистограммы сотря-

саемости, используемые затем при картировании сейсмической опасности и в реализации других связанных с этим задач.

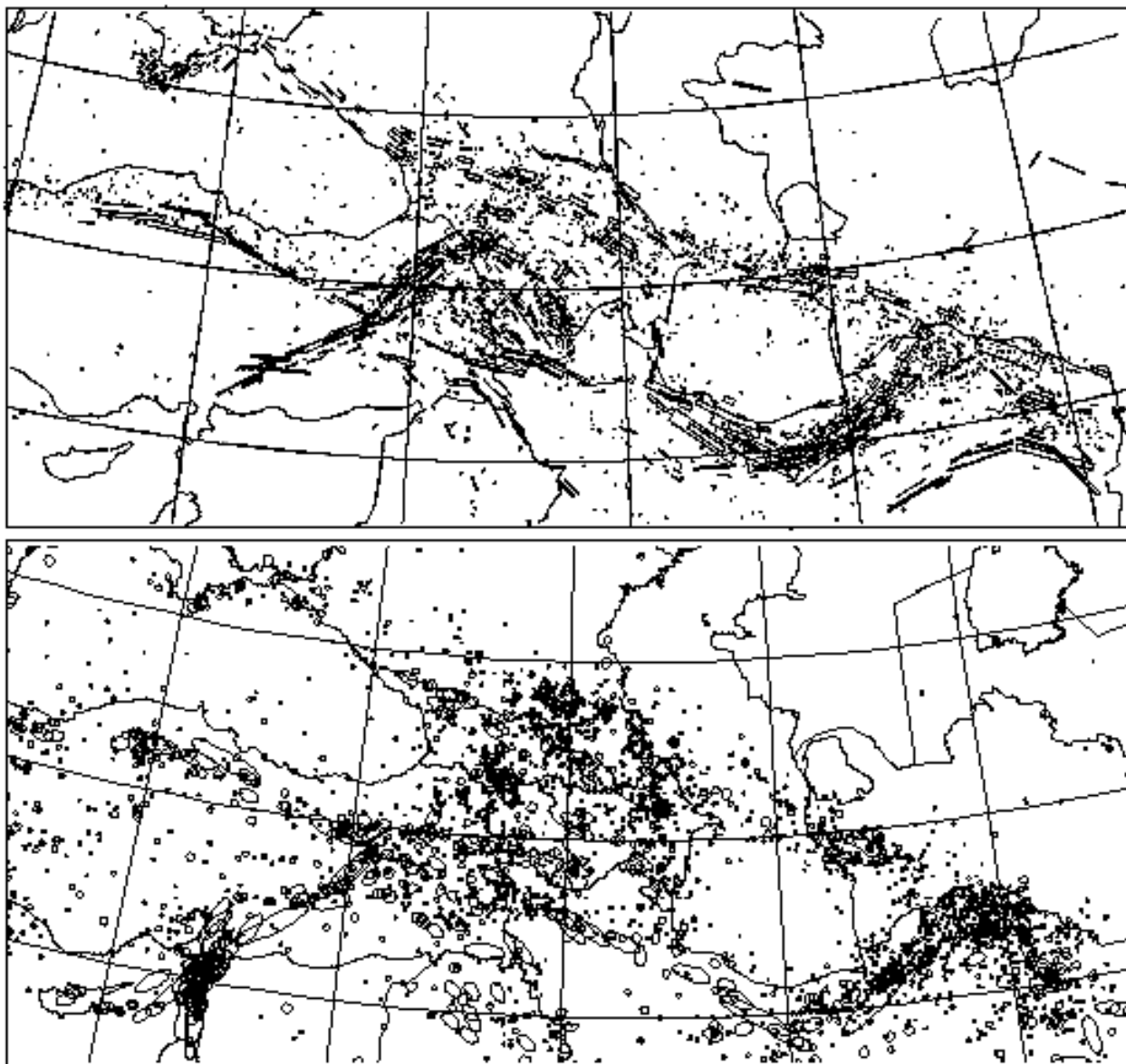


Рис. 13. Виртуальная (а) и реальная (б) сейсмичность Иран-Кавказ-Анатолийского региона.

МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

История вопроса и постановка задачи.

Основой сейсмического районирования является оценка долговременной средней опасности проявления сотрясений разной интенсивности в любом месте земной поверхности без указания конкретных моментов времени, когда они могут проявиться.

В 1965г. Ю.В.Ризниченко [22, 23] предложил описывать сейсмическую опасность величиной сотрясаемости (B), определяемой для каждой точки поверхности Земли как среднегодовое число сотрясений, равных или превышающих определенный фиксированный уровень интенсивности (I), тогда $T=I/B$ – период сотрясаемости или средний интервал времени между такими сотрясениями. В последующие годы Ю.В.Ризниченко с коллегами были разработаны методика и программы расчета сотрясаемости и построены карты для ряда сейсмоопасных районов бывшего СССР [24 – 27, 49 и др.].

В 1968г., спустя год после первой публикации Ю.В.Ризниченко за рубежом [64], К.А.Корнелл [56] опубликовал методику расчета сейсмического риска – аналог «сотрясаемости», по Ю.В.Ризниченко. Первая публикация о применении метода К.А.Корнелла для сейсмического районирования территории США появилась в 1973г. [53, 54]. Близкий подход к оценке сейсмической опасности был развит в начале 70-х годов В.И.Кейлис-Бороком с коллегами [13]. Позднее сотрясаемость, по Ризниченко-Корнеллу, получила в литературе название «seismic hazard» – сейсмическая опасность.

В то время это были прогрессивные разработки, т.к. впервые вводилась количественная мера сейсмической опасности – ее вероятностная оценка. В тоже время в технологию создания прошлой карты сейсмического районирования территории бывшего СССР (ОСР-78), как уже отмечалось выше, методика расчета сотрясаемости не вошла и эта карта по существу, как и все предыдущие, опиралась лишь на экспертные заключения.

Схема расчета сотрясаемости по Ю.В.Ризниченко заключается в следующем. Сначала на основе детальных наблюдений оцениваются повторяемость слабых землетрясений, т.е. долговременная сейсмическая активность A , характеризующаяся числом землетрясений фиксированного энергетического класса $K=10^{4-\gamma K}$, нормированным на единицу времени (чаще всего, $K=10$, а интервал времени – один год), и величиной γ – тангенсом угла наклона графика повторяемости землетрясений. При этом, как отмечалось выше в качестве одного из недостатков карты ОСР-78, график рассматривался в виде логлинейного отрезка прямой на всем диапазоне энергетических классов K , вплоть до K_{max} . Величина K и магнитуда M обычно связаны друг с другом выражением $K=aM+c$. Затем по данным об A , γ и K_{max} рассчитываются поток опасных сейсмических событий и, с учетом магнитуды и затухания интенсивности с расстоянием $I(M, r)$, определяется поток сотрясений с интенсивностью I , большей некоторого порога I_{up} (сотрясаемость B) по данным о потоке опасных землетрясений и детерминированной для заданных пунктов территории.

К основным недостаткам методик, разработанных в 60-70-ые годы, можно отнести следующие:

- оценка долговременных параметров сейсмичности лишь на основе сведений о произошедших землетрясениях в исторически ограниченный интервал времени, что искажает оценку этих параметров, поскольку разрушительные сейсмические события, близкие к максимальным возможным, возникают в том или ином месте, как правило, очень редко и могли не произойти в рассматриваемый интервал времени;

- опора на линейное представление графика повторяемости землетрясений вплоть до максимального возможного землетрясения, что существенно занижает оценку повторяемости максимальных или близких к ним сейсмических событий (отклонение графика повторяемости от линейного закона описано в многочисленной литературе [10, 39, 44 – 46 и др.] и показано выше на рисунках 5 и 6 Более подробный анализ методик содержится в [10]);

- использование в расчетах представлений о сейсмических очагах как о точечных, а не о протяженных реальных объектах;

- фиксирование гипоцентров на заданной глубине, в то время как реальные очаги располагаются в слоях определенной толщины или заполняют собой объемную зону сложной конфигурации как, например, в Курило-Камчатской фокальной зоне землетрясений;

- использование в качестве характеристики величины землетрясений энергетических классов K или магнитуд M_{LN} вместо более физических характеристик, таких как сейсмический момент M_0 и моментная магнитуда M_W .

- не учет случайного фактора в зависимости интенсивности сотрясений I от магнитуды M и гипоцентрального расстояния r до пункта наблюдения, что приводит к неконтролируемым искажениям результатов расчета сотрясаемости, в то время как реальный средний

макросейсмический эффект при заданных M и r имеет стандартное уклонение σ порядка 0,5-1,0 баллов.

С целью избежать указанных выше недостатков и осуществить расчеты сейсмической опасности для создания новой карты общего сейсмического районирования на строгой количественной основе была разработана усовершенствованная методика расчета сотрясаемости и создана компьютерная программа ее реализации. Решение этой задачи подробно описано в работах [10 – 12, 58 – 60].

Методика вычисления сейсмической опасности.

Предлагаемая обновленная методика оценки сейсмической опасности развивает методологию оценки сейсмической опасности, содержащуюся в подходах Ю.В.Ризниченко, В.И.Кейлис-Борока с коллегами и К.А.Корнелла, но лишена многих недостатков этих подходов, о которых сказано выше.

В качестве основы карты сейсмической опасности принимается карта расчетной сейсмической интенсивности (балльности) I со средней повторяемостью в данной точке 1 раз за T лет (обозначается I_T). Повторяемость интенсивности I за T лет – это число землетрясений, вызывающих сотрясения интенсивностью $\geq I$ баллов. Повторяемость в среднем 1 раз за T лет означает, что вероятность P превышения интенсивности I_T в течение t лет (т.е. произойдет хотя бы одно такое событие) равна:

$$P = 1 - \exp(-t/T) \text{ и при } t \ll T - P = t/T. \quad (8)$$

Например, при $T = 500$ и $t = 50$ лет P составит $\sim 10\%$ (точное значение – 9,52); при $T = 1000$ лет и $t = 50$ лет $P \sim 5\%$ (точнее – 4,88). Рассчитав набор карт I_T для разных T , т.е. с различной вероятностью превышения (или не превышения) расчетной интенсивности в заданный интервал времени, можно оценить степень «сейсмического риска». Задавшись величиной допустимого «сейсмического риска» для рассматриваемого строительного объекта, можно выбрать необходимую карту расчетной интенсивности I_T .

Карта расчетной балльности I_T (карта сотрясаемости) рассчитывается по модельному каталогу землетрясений с использованием региональной зависимости балла от магнитуды и расстояния для протяженного источника. Как уже отмечалось выше, модельный каталог создается по долговременным характеристикам сейсмичности изучаемого региона.

Процедура расчета состоит из двух этапов – подготовки данных и собственно расчета величины I_T . Подготовка данных соответствует принятой и описанной выше методологии сейсмического районирования (см. рис. 2) и включает в себя оценку долговременных характеристик сейсмичности рассматриваемого региона и его структурных элементов (модель сейсмических источников), определение связи интенсивность-магнитуда-расстояние (модель сейсмических воздействий), спецификацию детальности карты, расчетный период T и точности вычислений, создание модельного каталога, накопление гистограмм сотрясений в узлах заданной решетки на карте, определение расчетного балла – величины сейсмической опасности. Далее остановимся на каждой из составляющих расчетов.

На карте выделяется район, для которого необходимо построить карту сейсмической опасности. Задается минимальный уровень сейсмической опасности, например, 5 баллов. Вне рассматриваемого района, вдоль его границы, определяется полоса такой ширины, чтобы расположенные в ее пределах и удаленные от границ исследуемой территории очаги сильнейших землетрясений создавали сотрясения в районе, соответствующие минимальному выбранному уровню. Изучаемый район вместе с определенной указанным способом погра-

ничной полосой составят максимальную по площади рабочую территорию, для которой должна рассчитываться сотрясаемость I_T .

В данном разделе мы укажем на требования, которые надо выполнить при задании характеристик сейсмичности (модель сейсмичности). Методике же конструирования модели прогнозной сейсмичности и ее сейсмологической параметризации посвящены предыдущие разделы этой работы и целый ряд публикаций [34, 38, 39, 46 и др.].

Информация о долговременных характеристиках сейсмичности составляется в специальном формате, что позволяет зафиксировать то решение экспертов (сейсмологов, геологов и других специалистов), которое (вместе с моделью воздействия) и определит в общих чертах схему расчета сейсмической опасности. Экспертная оценка, как обычно, должна использовать: инструментальные и исторические каталоги землетрясений; эмпирические графики повторяемости $IgN(M)$; геологические сведения о повторяемости и предельной силе землетрясений (в первую очередь, данные о поверхностных сейсмодислокациях); геоструктурные данные (геология, тектоника и пр.); информацию о районах-аналогах. Этот список не исчерпывающий и в ряде районов он может быть расширен.

Специальный формат для данных о долговременной сейсмичности заключается в разбиении рабочей территории (области, для которой составляется карта ОСР, и ее окаймления) на участки, называемые условно-однородными зонами. В описанной выше ЛДФ-модели зон ВОЗ такие зоны представлены в виде трех основных структурных элементов – линеаментов, доменов и потенциальных очагов землетрясений [34, 39, 46]. Предполагается, что в пределах каждой из таких зон плотность эпицентров постоянна, а распределение событий по глубине и магнитуде можно считать неизменным как по площади (объему), так и вдоль линеаментов.

Для каждого структурного элемента зон ВОЗ задаются границы (географические координаты вершин многоугольников – для доменов, в том числе и для «косых» слоев, как в Курило-Камчатской фокальной зоне, концов и изломов – для линеаментов и потенциальных очагов), график повторяемости землетрясений, глубины сейсмоактивного слоя, информация о свойствах протяженных очагов (ориентировка: азимут простираения и угол наклона очага-площадки).

График повторяемости землетрясений (от M_{min} до M_{max}) строится с учетом всей имеющейся информации как сейсмологической (палео, исторической и инструментальной), так и геолого-тектонической. При этом, как отмечалось, график не предполагается линейным при экстраполяции его в область более крупных и максимальных возможных землетрясений. Практически, лучше задавать помагнитудное (интервальное) распределение числа землетрясений. Предпочтительнее вести построение в магнитудах M_W , но допускается использование корреляционных зависимостей для перевода магнитуд исходного каталога в моментные магнитуды M_W [8].

Каждая зона ВОЗ, хотя и характеризуется распределением эпицентров или гипоцентров землетрясений, в расчетах участвуют не эти «точки», а сами протяженные очаги. При этом большие очаги могут «протыкать» границы зон. Поэтому, для каждой зоны и каждого очага землетрясения с магнитудой M каждый участок границы зоны должен быть специфицирован как «протыкаемый» или «непротыкаемый». В плане возможно кажущееся пересечение разных зон, например, в случае размещения в одном и том же месте, но на разной глубине самостоятельных сейсмоактивных слоев (доменов), отличающихся уровнем сейсмической активности и величиной M_{max} . Линеаментные же структуры, как было показано в предыдущих разделах, могут пересекаться самым различным образом и представлять основной «каркас» модели сейсмических источников [34, 46].

Следует еще раз подчеркнуть, что наиболее важным отличием предлагаемого метода от традиционных подходов является учет долговременной сейсмичности и нелинейности графика $IgN(M)$ в области крупных сейсмических событий, вплоть до M_{max} . При этом важно

учитывать факторы возможного завышения уровня сейсмической активности (например, за счет вклада афтершоков больших землетрясений) и занижения (малый срок детальных наблюдений и ограниченность данных за слабо активные сейсмические периоды). В качестве нулевого приближения можно ввести фиксированный повышающий коэффициент, который учитывает вероятное и часто наблюдаемое отклонение реального графика от прямой вверх в этой области (см. рис. 6).

Подход с разделением наблюдаемой и долговременной повторяемости землетрясений позволяет рассчитывать варианты карт I_T при одинаковых исходных сейсмологических данных и дает, таким образом, ясную основу для экспертных оценок при выборе нормативной карты районирования. Все экспертные решения должны делаться и корректироваться именно на этапе оценки долговременной сейсмичности. «Экспертная правка» самой карты I по существу бессмысленна.

Связь интенсивности с магнитудой и расстоянием.

Модель сейсмического эффекта ($I(M,r)$) моделируется по эмпирическим данным в регионе [12]. Для аппроксимации этих данных и прогноза интенсивности используется модель такой связи на основе представления о некогерентном протяженном очаге [7] в виде излучающей площадки прямоугольной формы с параллельной дневной поверхности длинной стороной. Очаг характеризуется моментной магнитудой. Длина и ширина площадки и их соотношение зависят от магнитуды и сброшенного напряжения. Гипотеза геометрического и динамического подобия очагов используется для прогноза средних параметров площадки по моментной магнитуде; отклонение от этой гипотезы также моделируется: разброс по сброшенному напряжению – как случайная величина, а соотношение длины и ширины – как детерминированная функция магнитуды. Фактический разброс балла в точке наблюдения при данной магнитуде моделируется на основе гипотезы нормального закона распределения для ошибки прогноза балла по принятой расчетной схеме. Значение стандартного уклонения этого закона задается. Модель учитывает эффекты насыщения интенсивности вблизи очага, нелинейность зависимости балла от расстояния $I(lgr)$ и «насыщение» магнитуды при больших M_0 . Таким образом, снимается проблема завышения балла при малых расстояниях и автоматически моделируется эллиптичность изосейст в ближней зоне от очагов больших магнитуд.

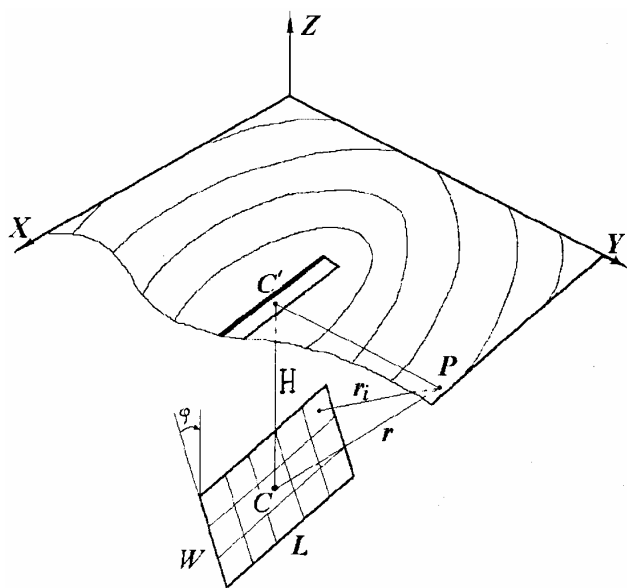


Рис. 14. Схема расчета интенсивности. C - гипоцентр, C' - эпицентр прямоугольного очага длины L и ширины W на глубине H , наклоненного под углом φ . Плоскость XY - дневная поверхность, P - точка наблюдения («приемник»), r - гипоцентральное расстояние, r_i - расстояние до i -ого субисточника, на которые разбит очаг. Прямоугольник на плоскости XY - проекция очага на дневную поверхность, утолщенная сторона - проекция верхней кромки очага. Кривые на плоскости XY - изосейсты от данного очага.

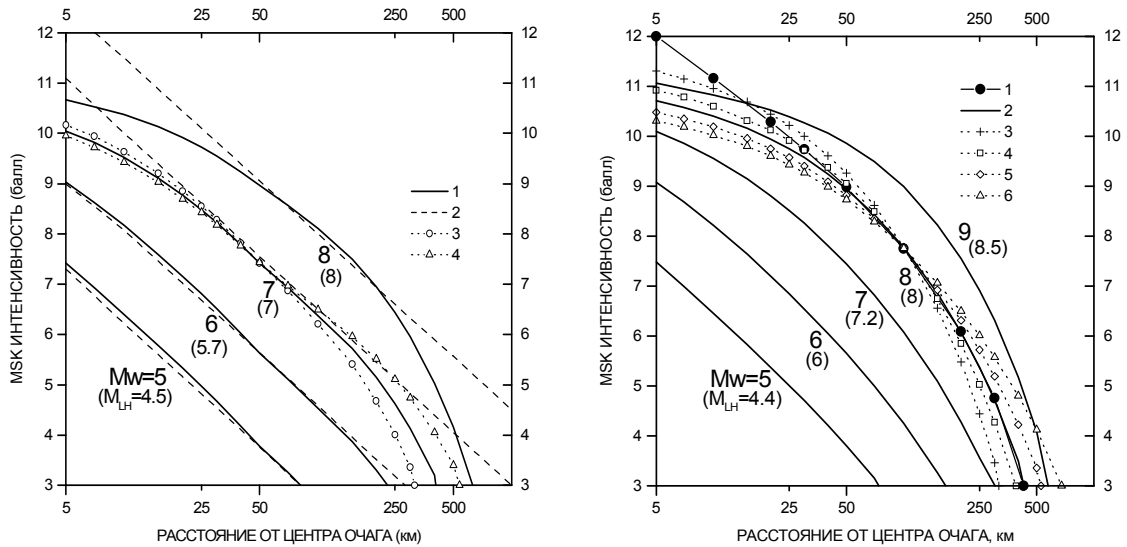


Рис. 15 а, б. Графики спадания балльности с расстоянием.

а) Сплошные кривые – по модели для материковой части Северной Евразии, пунктир – по Н.В.Шебалину [19].

б) Курило-Камчатско-Японский регион. 1 - по [49]; 2 - по модели, предлагаемой в настоящей работе, с $r_Q = 90$ км; 3-6 – расчет по модели для $M_W = 8$ и r_Q , соответственно, 50, 70, 130, 200 км (справа).

Интенсивности I в точке на удалении r от центра прямоугольного очага размером $L \times W$, состоящего из N элементарных излучателей, (рис. 14) определяется по формуле:

$$I = I_b + C_M(M_W - M_{Wb}) + C_A \{ \lg[(1/N) \sum_i \Phi(r_i)] - \lg[(1/N_b) \sum_j \Phi(r_{jb})] \}, \quad (9)$$

где I_b – балл от базового очага с магнитудой M_{Wb} на расстоянии r_b от его центра по нормали; r_i (r_{jb}) – расстояние от i -того (j -того) субисточника очага (базового очага) до точки; в которой вычисляется I (I_b); $\Phi(r)$ – функция, моделирующая затухание

$$\Phi(r) = r^{-2n} \exp(-r/r_Q) \equiv g(r, n, r_Q), \quad (10)$$

$$r_Q = c Q(f_1) / 2\pi f_1,$$

где c – скорость S -волн, f_1 – средняя частота, Q – добротность среды.

Более сложный вариант затухания предполагает две ветви:

$$\Phi(r) = \begin{cases} g(r, n_1, r_{Q1}) & \text{при } r < r_c \\ g(r, n_2, r_{Q2}) & \text{при } r > r_c \end{cases}$$

Параметры модели для материковой части Северной Евразии:

$$C_A = 1,667; C_M = 1,85; n_1 = 1; n_2 = 0,5; RQ_1 = RQ_2 = 100 \text{ км}; r_c = 70 \text{ км}; \\ I_b = I(M_W = 6,23 (M_{LH} = 6), r_b = 50 \text{ км}) = 6,05 \text{ балла}$$

Параметры модели для Курило-Камчатской фокальной зоны:

$$C_A=1,667; C_M=1,85; n=1; RQ= 90 \text{ км};$$

$$I_b= I(M_{wb}=8 (M_{LH}=8), r_b=100 \text{ км})=7,75 \text{ балла}$$

На рис. 15а,б приведены графики спадания балльности с расстоянием для материковой части Северной Евразии (рис.15 а) и для Курило-Камчатского региона (рис. 15 б).

Детальность карты, расчетный период T и точность вычислений.

Составляется список точек с их географическими координатами, для которых нужно определить сейсмическую опасность. Обычно исследуемый регион (без пограничной зоны) покрывается сеткой с заданным шагом между узлами, в которых рассчитывается балльность. Шаг сетки зависит от масштаба работ. При расчетах сейсмической сотрясаемости территории Северной Евразии за оптимальный шаг принят 25 км x 25 км.

Далее задаются расчетный период времени T , исходя из степени приемлемого риска, которую необходимо обеспечить в заданное время t , и время T_{max} – длительность модельного каталога, которая определяет точность вычислений. Точность расчета в $\pm 0,1$ балла для I_T обеспечивается каталогом за время, превышающее T в 100 раз ($T_{max}/T=100$).

В таблице 3 приведены данные о зависимости вероятности P появления хотя бы одного сотрясения большего или равного I баллов от соотношения t/T периода T повторения сотрясения такого балла и продолжительности t срока его ожидания [27].

Таблица 3.

t/T	0.01	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
P	0.01	0.095	0.181	0.394	0.632	0.865	0.9933	0.99995

Например, при данном конкретном строительстве или при создании карты общего сейсмического районирования принимается $P = 0.095$, т.е. с такой вероятностью допускается появление сотрясений $I \geq I_i$ в течение заданного времени, например, $t=50$ лет. Этой вероятности P , по таблице 3, соответствует $t/T = 0.1$ и, следовательно, для ее обеспечения нужно рассчитать карту балльности с периодом повторения равным $T = 50 : 0,1 = 500$ лет. Для обеспечения технологической точности в 0,1 балла необходимо превысить расчетное время T в 100 раз. Отсюда получаем время модельного каталога $T_{max}= 50000$ лет. При этом расчетный балл I_{500} будет определяться как среднее из 100 реализаций каталога длительностью 500 лет.

Модельный каталог.

По заданным долговременным характеристикам сейсмичности региона методом статистического моделирования (Монте-Карло) [2, 50] создается модельный каталог землетрясений [65, 66]. Каждое событие в каталоге характеризуется моментной магнитудой, длиной, шириной, азимутом простирания и углом падения площадки очага, географическими координатами и глубиной гипоцентра. С модельным каталогом можно работать как с обычным наблюдаемым каталогом: строить графики повторяемости, карты проекций площадок очагов на поверхность (аналог карты эпицентров при точечном очаге) (рис.16), вертикальные разрезы очаговых зон и т.п. Такие построения позволяют убедиться в правильности отражения характеристик сейсмичности региона модельным каталогом.

Интенсивность сотрясений.

От каждого события модельного каталога по зависимости «балл-магнитуда-расстояние», используя формулу (11), рассчитывается интенсивность сотрясений в узлах сетки, которой покрывается исследуемый регион. В результате обработки всего каталога для каждого узла сетки накапливается гистограмма сотрясений $N(I_i)$ за время каталога T_{max} . При

этом ось I , начиная с $I=3$ балла, разбита на 36 интервалов с шагом 0,25 балла. Значения $N(I_j)$ накапливаются для каждого интервала и относятся к центру интервала:

$$I_i = 3,125 + (i-1) * 0,25; \quad (i = 1, \dots, 36).$$

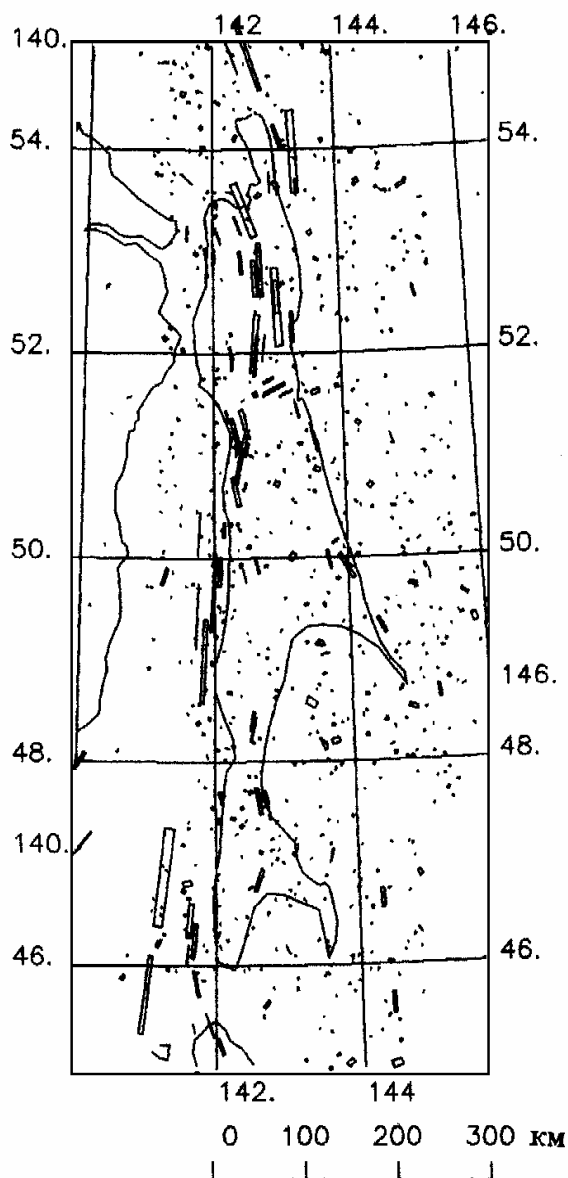


Рис.16. Проекция на дневную поверхность очагов землетрясений с $M \geq 3.5$ Сахалинского региона по модельному каталогу за 100-летний интервал времени. Длина прямоугольника пропорциональна магнитуде, ширина – углу наклона площадки (очага).

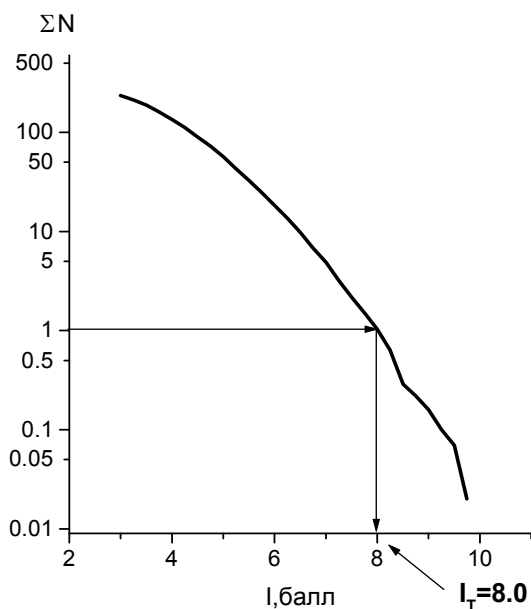


Рис. 17. Пример определения расчетного балла I_T по гистограмме.

Затем, вычисляется кумулятивная гистограмма $N_S(I_j) = \sum N(I_j)$ (суммирование по $j \geq i$), гистограмма $N_S(I_j)$ делится на $N_P = T_{max}/T$ – число периодов длительностью T , в результате получается кумулятивная гистограмма $n_S(I_j)$ за заданное время T (рис.17). С нее считывается значение балла I_T при $n_S=1$. Это балл, повторяемость которого в данном пункте – один раз в T лет. Определяются также оценки точности величины I_T . Для этого строятся гистограммы $(n_S(I_j) - \sigma_j)$ и $(n_S(I_j) + \sigma_j)$, где $\sigma_j = \sqrt{n_S(I_j) / N_P}$ – среднеквадратичное отклонение величины $n_S(I_j)$. По каждой из этих гистограмм также считываются значения I_T при $n_S(I_j) \pm \sigma_j = 1$, которые определяют левую и правую границы интервала, характеризующего расчетную точность величины I_T (см. рис. 17). Размер интервала для I_T зависит от T_{max}/T , увеличение этого отношения в 10 раз сужает интервал ошибки в 3 раза.

По полученным таким образом в узлах сетки значениям I_T строится карта расчетного балла I_T – карта сотрясаемости. Далее, задавшись определенным правилом отнесения территории к зоне сейсмической опасности с баллом I_m , можно выделить зоны балльности. Например, при построении карты ОСР-97 к зоне балльности I были отнесены территории, заключенные между изолиниями $I \pm 0,5$ балла.

Следует отметить, что по предложенному алгоритму и программе расчета сотрясаемости можно рассчитать карты сотрясаемости также в величинах максимальных ускорений или в величинах ускорений на данной частоте колебаний грунта (спектральная сотрясаемость). Для этого нужно выразить модель сейсмического воздействия в этих параметрах.

Главные отличия и преимущества методики.

Главные отличия и преимущества предложенных и реализованных на практике методики и программ для усовершенствованного подхода к определению сейсмической опасности от методик 60-70 годов следующие:

- созданы условия для учета разнообразной информации о сейсмичности (структурирование поля сейсмичности, нелинейность графика повторяемости и др.) и очагах (размер, ориентировка, сброшенное напряжение и пр.), которая ранее игнорировалась;
- применено теоретически обоснованное описание поля некогерентного излучения в окрестности протяженного очага, что позволило решить проблему завышения балла при малых расстояниях и автоматически смоделировать эллиптичность изосейст в ближней зоне от очагов больших магнитуд;
- обеспечен учет распределения по глубине для очагов конечного размера;
- контролируется размещение протяженных очагов в пределах данной зоны и проводится корректный учет эффектов, связанных с расположением протяженных очагов большой магнитуды на линейных структурах, длина которых сопоставима с размером этих очагов;
- получаемый в результате набор карт сейсмической сотрясаемости в терминах балла с определенным периодом повторения сотрясений позволяет дать вероятностную оценку сейсмической опасности данной территории и обеспечить одинаковую степень риска в пределах карты с данным периодом повторения .

КОМПЛЕКТ КАРТ ОБЩЕГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Новая программа исследований [36] выполнялась большим коллективом исполнителей из нескольких десятков научно-исследовательских институтов Российской академии наук, ее Сибирского, Дальневосточного и Уральского отделений, а также академий наук бывших союзных республик (см. список организаций в конце статьи). Работа проводилась в тесной координации пятью тематическими рабочими группами, возглавлявшимися ведущими специалистами [31]:

- Разработка методологических основ и новой технологии общего сейсмического районирования (В.И. Уломов, А.А. Гусев).
- Унификация каталога землетрясений (Н.В. Кондорская, В.И. Уломов).
- Создание модели зон возникновения очагов землетрясений (В.И. Уломов, В.Г. Трифонов).
- Создание модели сейсмического эффекта (А.А. Гусев, Л.С. Шумилина).
- Расчет и картирование сейсмической опасности (В.И. Уломов, Л.С. Шумилина).

Концепция ОСР-97 включала в себя:

– представления о предельной величине максимальной возможной магнитуды землетрясений, обусловленной структурно-динамическим единством геофизической среды и развивающихся в ней сейсмических процессов, а в итоге – размерами, прочностными свойствами и интенсивностью взаимодействия геоблоков;

– принцип двухстадийности в оценке сейсмической опасности, базирующийся на создании двух взаимосвязанных прогнозных моделей – модели зон возникновения очагов землетрясений и модели создаваемого ими сейсмического эффекта;

– вероятностно-детерминированный подход к анализу сейсмологических и геолого-геофизических данных и вероятностный подход к оценкам параметров сейсмической опасности и сейсмического районирования.

Основой для создания комплекта карт ОСР-97, наряду с новой методологией, явилась достаточно однородная база сейсмологических и геолого-геофизических данных для всей территории Северной Евразии, представленная в картографическом и электронном виде в ГИС-технологии (отв. исп. В.И. Уломов, Ш.С. Андержанов, Ю.М. Колесников) и включающая в себя:

- Специализированный каталог землетрясений с $M \geq 4.5$ с древнейших времен по 1990 г., с $M \geq 3.5$ — с 1960 по 1990 гг. и с $M \geq 5.8$ за период 1991- 1995 гг. (отв. ред. Н.В. Кондорская и В.И. Уломов).
- Каталог очагов палеоземлетрясений (А.А. Никонов, Е.А. Рогожин, С.В.Хромовских).
- Каталог потенциальных очагов крупных землетрясений (Г.И. Рейснер, Е.А. Рогожин, Л.И. Иогансон).
- Каталог механизмов очагов землетрясений с $M \geq 6.0$ (Л.М. Балакина, А.И. Захарова, А.Г. Москвина, Л.С.Чепкунас).
- Карта очаговой сейсмичности (В.И. Уломов, Н.С. Медведева, Т.П. Полякова, Л.С. Шумилина).
- Карта сейсмической регионализации Северной Евразии (В.И. Уломов).
- Карта новейшей тектоники Северной Евразии (А.Ф. Грачев).
- Карта активных разломов (В.Г. Трифионов, А.И. Кожурин).
- Карта градиентов изостатических гравитационных аномалий (М.Е.Артемов, М.К. Кабан).
- Карта сейсмогеологической таксономии (отв. сост. Н.В. Шебалин, В.Г. Трифионов).
- Карта сеймотектоники шельфов (отв. сост. И.П. Кузин, А.И. Иващенко, Б.А. Ассиновская).
- Технология идентификации и сейсмологической параметризации зон возникновения очагов землетрясений (В.И.Уломов).
- Карта зон возникновения очагов землетрясений (линеamentно-доменно-фокальная модель) на территории Северной Евразии и характеристика их сейсмического режима (отв. ред. В.И. Уломов).
- Программно-математическое обеспечение расчетов сейсмической опасности (А.А. Гусев, В.М. Павлов, Л.С. Шумилина).
- Комплект карт районирования сейсмической опасности на территории Северной Евразии для трех уровней риска (отв. сост. В.И. Уломов, Л.С. Шумилина) (рис. 18).

Как уже отмечалось выше, принципиальным отличием новой методологии и техники от прежних приемов сейсмического районирования является: создание единой для всей территории Северной Евразии и количественно параметризованной линеamentно-доменно-фокальной модели зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ), представление оча-

гов в виде протяженных (а не точечных, как было прежде) сейсмических источников, используемое на всех этапах исследований по ОСП-97 – от идентификации сейсмоактивных структур до расчета сейсмической сотрясаемости земной поверхности, учет разнообразной нестандартной информации о региональной сейсмичности (фрактальная структура, нелинейность графиков повторяемости землетрясений и функции затухания сейсмического эффекта и др.) и о сейсмических очагах (размер, ориентировка, моментные магнитуды, сброшенное напряжение, размещение очагов в сейсмоактивном слое, а не на фиксированной глубине, как прежде и др.).

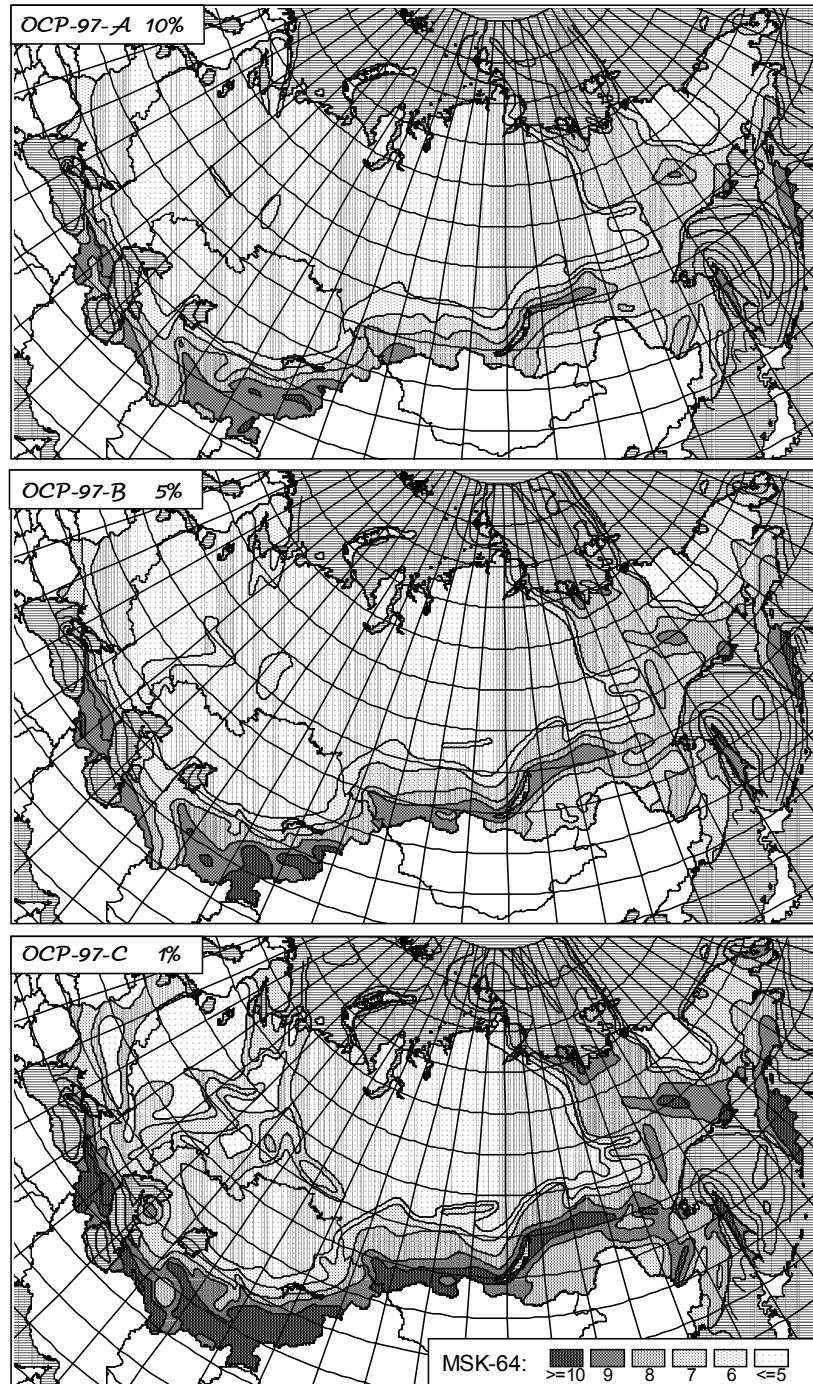


Рис. 18. Комплект карт Общего сейсмического районирования Северной Евразии – ОСП-97.

Новая технология оценки сейсмической опасности и сейсмического районирования, а также программно-математическое обеспечение ее реализации, в отличие от западной, получила название ВОСТОК-97 (EAST-97– Earthquake Adequate Sources Technology).

Комплект карт ОСР-97 (рис. 18) позволяет оценивать степень сейсмической опасности для объектов разных сроков службы и категорий ответственности на трех уровнях, отражающих расчетную интенсивность I сейсмических сотрясений в баллах шкалы MSK-64, ожидаемых на данной площади с заданной вероятностью $P(\%)$ в течение определенного интервала времени t (в данном случае, $t=50$ лет):

– Карта **ОСР-97-А** соответствует **10%**-ной вероятности превышения (или 90%-ной вероятности не превышения) расчетной интенсивности в течение 50 лет (период T повторяемости сотрясений один раз в 500 лет);

– Карта **ОСР-97-В** соответствует **5%**-ной вероятности превышения (или 95%-ной вероятности не превышения) расчетной интенсивности в течение 50 лет ($T=1000$ лет);

– Карта **ОСР-97-С** соответствует **1%**-ной вероятности превышения (или 99%-ной вероятности не превышения) расчетной интенсивности в течение 50 лет ($T=5000$ лет).

В иной трактовке, карты ОСР-97-А, ОСР-97-В и ОСР-97-С характеризуют 90%-ную вероятность не превышения (или 10%-ную вероятность превышения) расчетной интенсивности в течение 50, 100 и 500 лет, соответственно. По нашей рекомендации, карта ОСР-97-А должна быть предназначена для использования в массовом строительстве, карта ОСР-97-В – для строительства объектов повышенной ответственности (школы, больницы и т.п.) и карта ОСР-97-С – для особо ответственных сооружений (атомные станции, крупные гидротехнические сооружения, экологически опасные объекты и т.п.).

Площади зон сейсмической интенсивности на картах ОСР-97 России.

В соответствии с картами ОСР-97 (А, В и С) для территории Российской Федерации на рис. 19 приведены размеры площадей в % зон 6, 7, 8 и ≥ 9 баллов шкалы MSK-64 по отношению ко всей площади России. В первом столбце гистограммы показаны аналогичные величины для российского фрагмента карты ОСР-78, но без дифференциации зон балльности по периодам повторяемости сотрясений (т.е. без учета индексов 1,2,3 на старой карте).

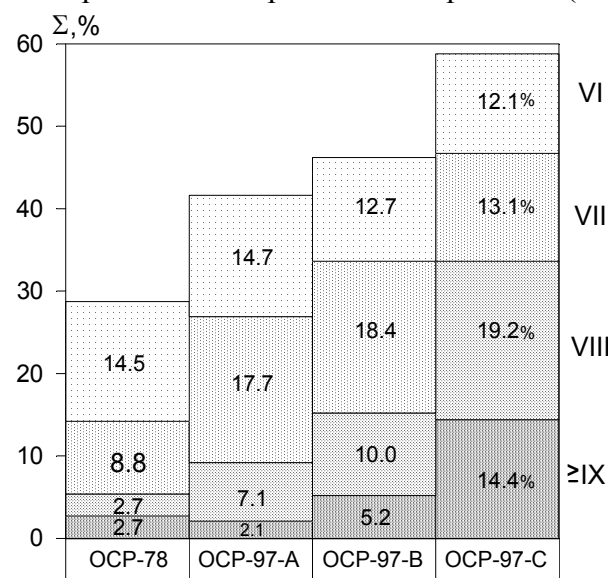


Рис.18. Соотношения размеров площадей (% внутри прямоугольников) зон сейсмической интенсивности (римские цифры справа) на картах ОСР-97 (А,В,С.) и ОСР-78. Шкала ординат соответствует кумулятивным значениям размеров площадей и отражает суммарные площади с интенсивностью, превышающей 6, 7, 8 и 9 баллов.

Как видно на гистограмме рис. 18, даже наиболее «рискованная» карта ОСР-97-А из нового комплекта превосходит по размерам площадей разной балльности карту ОСР-78. Незначительное уменьшение площади 9-балльной зоны на карте ОСР-97-А, соответствующей I_{500}

(т.е. $T=500$ лет), произошло главным образом за счет Прибайкалья, где по карте ОСР-78 она показана с индексом 2, что соответствует I_{1000} (т.е. $T=1000$ лет). На карте же ОСР-97-В площадь 9-балльной зоны Прибайкалья увеличилась. Менее всего претерпела изменения 6-балльная зона, определенным образом меняя свою конфигурацию от карты к карте. Осталь-

ные зоны увеличились по площади от 2-3 до 5-7 раз по сравнению с картой ОСР-78. Наиболее существенные изменения в сторону повышения оценки сейсмической опасности произошли на Северном Кавказе и на Дальнем Востоке, особенно в Приморском крае.

Поверхностные дислокации вдоль линеаментных структур.

Как известно, динамическое проявление внутрикоровых очагов землетрясений состоит не только в генерировании ими упругих сейсмических волн, вызывающих сотрясения окружающей среды, но и в возникновении необратимых смещений по разломам и деформаций земной поверхности. При крупных землетрясениях поверхностные дислокации могут достигать нескольких метров (Табл. 2) и представлять не меньшую опасность, особенно для протяженных строительных объектов (плотины, мосты, трубопроводы, транспортные магистрали и т.п.), чем само землетрясение. Амплитуду смещения a_M (метры) бортов разломов вдоль соответствующих линеаментов можно определить по приведенной ниже формуле, отражающей величину средней относительной деформации $\varepsilon \approx 10^{-4}$ пород в центральной части очага (т.е. на отрезке $L/2$) при его вспарывании:

$$\log a_M = 0.6M - 3.8.$$

В Таблице 4 представлены средние и интервальные (в скобках) значения величин амплитуд a_M (метры) смещения бортов разломов вдоль линеаментов разного ранга (ширина w , км) и интервалы времени Δt (сек) вспарывания очагов землетрясений соответствующих магнитуд M .

Таблица 4.

M	A_M , м	W , км	Δt , сек
8.5 (8.3-8.7)	20 (15-30)	40	90-180
8.0 (7.8-8.2)	10 (7-13)	20	40-80
7.5 (7.3-7.7)	5.0 (4-6.5)	10	20-40
7.0 (6.8-7.2)	2.5 (2.0-3.0)	5	10-20
6.5 (6.3-6.7)	1.3 (1-1.6)	3	6-10
6.0 (5.8-6.2)	0.6 (0.5-0.9)	2	3-5

Поскольку ущерб строительным объектам могут нанести не только быстрые подвижки грунта, сопровождающие землетрясения, но и чрезвычайно медленные (криповые) тектонические перемещения бортов разломов, то, зная средний период T_M (годы) повторяемости сейсмических событий с магнитудой M_{\max} вдоль каждого линеамента или его сегмента, можно в первом приближении оценить среднегодовую скорость V_{cr} (см/год) криповых смещений вдоль каждого из них, а также примерную суммарную амплитуду a_{cr} (метры) крипа, накопленную за ΔT лет (например, за срок службы сооружения) по формулам:

$$\log V_{cr} = 0.6M_{\max} - \log T_M - 2.0.$$

$$a_{cr} = 0.01 V_{cr} \cdot \Delta T.$$

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Землетрясения сопровождают человечество на всем протяжении истории его развития, а жертвы от них составляют около 60% всех человеческих потерь при различных стихийных бедствиях. В то время как крупнейшие катастрофические события с магнитудой $M=8.5$ и выше случаются довольно редко и в ограниченных регионах мира, сильные и умеренные землетрясения с $6.5 < M < 7.5$ могут происходить во всех континентальных районах, хотя и с разной частотой повторения. Более слабые сейсмические события с $5.0 < M < 6.5$ слу-

чаются практически повсеместно. Средняя частота возникновения за год на земном шаре землетрясений различной величины составляет: 1 – для наиболее значительных землетрясений с $M > 8.0$; 10 – для крупных сейсмических событий с $M = 7.0$; 100 – для умеренных землетрясений с $M = 6.0$ и более 1000 – для небольших землетрясений с $M = 5.0$.

Признавая природные бедствия в качестве главной угрозы развитию человечества, Организация Объединенных Наций (UN), решила провести под своей эгидой в период 1990 – 2000 гг. Международную Декаду по уменьшению ущерба от природных бедствий (UN/IDNDR). Цели Декады состоят в том, чтобы на основе применения достижений современной науки и новых технологий повысить во всем мире осведомленность населения о природных бедствиях, способствовать уменьшению и предотвращению ущерба от природных катастроф. Научный и технический комитет (STC) Декады в качестве необходимой меры реализации стратегии уменьшения риска признал целесообразным осуществить международные демонстрационные проекты (Женева, март 1992 г.), разрабатываемые для повышения достоверности оценок опасности стихийных бедствий (землетрясений, вулканов, тропических циклонов, наводнений и т.п.).

В число ключевых программ, принятых в рамках Декады, вошли предложения Международной программы по изучению литосферы (ILP) осуществить Программу оценки глобальной сейсмической опасности (Global Seismic Hazard Assessment Program – GSHAP), поддерживаемые Международным комитетом научных союзов (ICSU). Программа GSHAP координируется с другими программами по оценке сейсмической опасности, реализуемыми международными организациями (например, IASPEI, ICSU, IUGG PAIGH, ESC, HABITAT, UNESCO), и с инициативами международных сообществ по инженерной сейсмологии (IAEE, WFEO/UATI). Она объединяет результаты трех проектов Международной программы ILP – мировой карты напряженно-деформированного состояния, карты активных разломов мира и палеосейсмичности позднего голоцена, предпринятых для улучшения понимания процессов возникновения землетрясений и интеграции другой геофизической и геологической информации.

GSHAP охватывает большую часть приоритетных и стратегических направлений Декады, заполняя существующую во многих странах брешь в попытках правильных оценок сейсмической опасности их территории, необходимых для осуществления стратегии уменьшения риска. Программа ориентируется на регионально координируемый унифицированный подход к оценке сейсмической опасности. Конечным результатом реализации Программы будут полученные к концу Декады оценки сейсмической опасности территории различных стран, регионов и Земли в целом. Применение на практике правильных оценок сейсмической опасности для уменьшения сейсмического риска позволит сконцентрировать усилия на предупреждении негативных последствий землетрясений, а не на последующем их устранении.

Первый год реализации GSHAP был начат с совещания по разработке технической политики, состоявшегося в Риме в июне 1992 г., в котором приняли участие В.Н.Страхов, А.Д.Гвишиани, В.И.Уломов (ОИФЗ РАН) и В.Г.Трифонов (ГИН РАН) [57]. Оно было посвящено главным образом разработке регионального деления земного шара и выбору Региональных центров на всех континентах, а также инициированию начала работ на тестовых полигонах в районах с высоким уровнем сейсмической активности. С этого момента наши исследования по сейсмическому районированию Северной Евразии были скоординированы с GSHAP и вошли в эту Международную программу составной частью. Реализация GSHAP на территории Северной Евразии, охватывающей территорию России, всех стран СНГ и сопредельные сейсмоактивные регионы стран Восточной Европы, Ближнего Востока, Центральной и Восточной Азии, осуществлена путем создания в России при Институте физики Земли РАН Регионального центра GSHAP – одного из девяти Международных региональных сейсмологических центров GSHAP:

1. Северная и Центральная Америка (Мехико);
2. Южная Америка (Сант-Яго);
3. Центральная Европа (Потсдам);
4. Запад Средиземноморья (Рабат);
5. Континентальная Африка (Найроби);
6. Средний Восток (Тегеран);
7. Северная Евразия (Москва);
8. Центральная и Южная Азия (Пекин);
9. Восточная Азия - Океания (Манила).

Московский региональный центр (Научный координатор В.И.Уломов) возглавил также исследования на тестовом Крым-Кавказ-Копетдагском полигоне, основы которого были заложены на двух международных совещаниях, организованных ОИФЗ РАН в 1993 г. в Москве и в 1994 г. в Ашхабаде. В дальнейшем аналогичные совещания проводились в Ереване (1996 г.) и Тбилиси (1997 г.), а также за пределами стран СНГ. Результаты работ на разных этапах регулярно освещались нами в хрониках журнала «Физика Земли» [43 – 45], в специальных тематических сборниках [68 – 70] и в других публикациях.

Координатор GSHAP – Д.Джардини (Италия). Координационный центр GSHAP функционируют в Национальном геофизическом институте Италии в Риме, а с 1996 г. – Геофизическом центре в Цюрихе. Ожидается, что Региональные центры будут существовать и после завершения работ в рамках Декады, расширяясь и развиваясь в последующие годы, и обеспечат возможность модернизации моделей сейсмической опасности по мере получения новой информации в науках о Земле.

В результате исследований по GSHAP в ОИФЗ в 1997 году была создана карта районирования сейсмической опасности Северной Евразии (Регион 7) в терминах пиковых ускорений (PGA), вероятность превышения которых в течение 50 лет составит 10%. Для этого была использована составленная нами карта ОСР-97-А, пересчитанная нами в PGA. Эта карта, пояснительная статья, специализированный каталог землетрясений и основные параметры зон возникновения очагов землетрясений в настоящее время находятся на странице Интернет в Швейцарии: <http://seismo.ethz.ch/gshap/nordasia> (Цюрих).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для территории Российской Федерации Комплект новых карт ОСР-97 составлен в соответствии с Техническим заданием Минстроя России (от 31 января 1996 г.) и предназначен для использования в новой редакции Строительных норм и правил (СНиП-II-7) «Строительство в сейсмических районах».

Общее сейсмическое районирование впервые осуществлено для всей территории Северной Евразии, включая равнинные территории и шельфы окраинных и внутренних морей. Комплект карт ОСР-97 должен заменить действующую с 1978 года, но не оправдавшую себя, нормативную карту ОСР-78.

Как показали новейшие исследования, свыше трети территории Российской Федерации подвержено 7-балльным сейсмическим воздействиям, требующим проведения антисейсмических мероприятий. Более 15% площади России занимают чрезвычайно опасные в сейсмическом отношении 8-9-ти и 9-10-балльные зоны. К ним относятся весь Дальний Восток, юг Сибири, а также Северный Кавказ. Определенную угрозу в сейсмическом отношении представляют и 6-7-балльные зоны Европейской части России, а также шельфы окраинных и внутренних морей. Это, прежде всего, Средний Урал и Приуралье, Приазовье, Поволжье, Кольский полуостров и сопредельные с ними территории.

В нефтедобывающих районах Татарстана, на горно-промышленных объектах Пермской области и других субъектов Российской Федерации к естественной сейсмичности до-

бавляется и индуцированная локальная сеймотектоническая активизация, способная причинить дополнительный ущерб народному хозяйству. Известны местные землетрясения и в Воронежской области, где расположена Ново-Воронежская АЭС. Сейсмоопасными и в связи с этим экологически уязвимыми являются бассейны Черного и Каспийского морей, шельфы моря Лаптевых, Охотского, Чукотского и Баренцево морей, являющиеся поставщиками газо- и нефтепродуктов. Продолжительные низкочастотные 4-5-балльные сотрясения, распространяющиеся на огромные расстояния от заглубленных очагов крупных землетрясений в Восточных Карпатах, способны повредить чувствительные к таким колебаниям уникальные высотные строительные объекты даже на большом удалении от эпицентров, в том числе на территории Москвы и Московской области.

Сейсмическая опасность растет с каждым годом в прямой связи с хозяйственным освоением сейсмоопасных территорий и активным воздействием человека на литосферную оболочку Земли (бесконтрольная откачка нефти и газа, добыча других полезных ископаемых, строительство крупных гидротехнических сооружений, захоронение промышленных отходов и т.п.). Повышенный сейсмический риск связан с размещением в сейсмоактивных регионах атомных электростанций и других экологически опасных объектов, поскольку даже незначительные землетрясения и вторичные поражающие факторы (оползни, обвалы, трещины на земной поверхности и т.п.) могут нарушить их нормальное функционирование.

Новая методика создания моделей зон ВОЗ и расчета сейсмической опасности, в отличие от западной, названа нами ВОСТОК-97 (EAST-97 – Earthquake Adequate Source Technology – Технология адекватных очагов землетрясений).

Дальнейшее развитие фундаментальных и прикладных исследований в области сейсмогеодинамики и сейсмического районирования должно быть направлено на создание научных основ и методов динамического районирования сейсмической опасности, основанных на изучении динамики сейсмичности, миграции деформационных волн и сейсмической активизации, повторяемости землетрясений в одном и том же очаге и разработке других нерешенных проблем сейсмогенеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бунэ В.И., Медведев С.В., Ризниченко Ю.В., Шебалин Н.В. Успехи и надежды сейсмического районирования СССР // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. N 10. С.95-102.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 625 с.
3. Горшков Г.П. О сейсмическом районировании Средней Азии // Тр. Сейсмол. ин-та АН СССР. N 79(6). 1938.
4. Горшков Г.П., Схема сейсмического районирования СССР, Юбилейный сборник, ч.1, М.: АН СССР, 1947. 454 с.
5. Голицын Б.Б. Новая организация сейсмической службы в России. «Известия Постоянной Центральной сейсмической комиссии», т. 4, вып. 3, Императ. Академия наук, СПб., 1912.
6. Губин И.Е. Сеймотектонический метод сейсмического районирования, Труды Геофиз. института АН СССР, 1950, N 13 (140).
7. Гусев А.А. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясений и ее применение к оценке сильного движения // Вулканология и сейсмология. 1984, №1, С. 3-22.
8. Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами - среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология, 1990, №6, С. 55-63.
9. Гусев А.А. О необходимости корректировки документов, регламентирующих антисейсмические меры в СССР // Комплексная оценка сейсмической опасности. Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1991. Вып. 32. С. 147-160.

10. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Некоторые вопросы методики общего сейсмического районирования // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии, Вып. 2-3. М.: ОИФЗ РАН, 1995, С. 289-300.
11. Гусев А.А., Павлов В.М., Шумилина Л.С. Новый подход к расчетам повторяемости сейсмического воздействия с целью построения карт сейсмического районирования // Современная сейсмология: достижения и проблемы. Научная конференция РФФИ, НГК РФ, ИС РАН по проблемам международного десятилетия по уменьшению опасности стихийных бедствий. М. 7-9 октября 1998 г. 26 с.
12. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999 (в печати)
13. Кейлис-Борок В.И., Кронрод Т.Л., Молчан Г.М. Алгоритм для оценки сейсмического риска // Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1973. Вып.6. С.21-43.
14. Медведев С.В. К вопросу об учете сейсмической активности района при строительстве, Труды сейсмологического института АН СССР, N119, 1947.
15. Медведев С.В. Вопросы сейсмического районирования, Бюлл. Совета по сейсмологии, N8, 1960.
16. Мокрушина Н.Г., Шебалин Н.В. Оценка качества прогноза мест сильных сотрясений на картах сейсмического районирования СССР. Часть II. Карта ОСР-78 // Комплексная оценка сейсмической опасности. М.: Наука, 1991. С. 122-125. (Вопросы инженерной сейсмологии; Вып.32).
17. Мушкетов И.В. Материалы для изучения землетрясений России. - Изв. Рус. Геогр. Общества, 1891, вып. 1. 62 с.; 1899, вып. 2. 106 с.
18. Мушкетов И.В., Орлов А.Н. Каталог землетрясений Российской империи. СПб., (Записки Русск. Геогр. Общества), 1893, 582 с.
19. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 535 с.
20. Орлов А.П. О землетрясениях вообще и о землетрясениях Южной Сибири и Туркестанской области в особенности. Казань, 1872. 77 с. (Труды Общества естествоиспытателей при Казанском университете; Т. 3, №1, вып. 1).
21. Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. Сейсмический потенциал западной России, других стран СНГ и Балтии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ОИФЗ РАН, 1993, С. 186-195.
22. Ризниченко Ю.В. От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности, Известия АН СССР, Физика Земли, 1965, N11, стр.1-12.
23. Ризниченко Ю.В. Расчет сотрясаемости точек земной поверхности от землетрясений в окружающей области // Изв. АН СССР. Физика Земли. М.: Наука, 1966. N5. С.16-32.
24. Ризниченко Ю.В., Захарова А.И., Сейдузова С.С. Карты сейсмической сотрясаемости. // Докл. АН СССР. М.: Наука, 1967. Т.174. N4. С. 830-832.
25. Сейдузова С.С., Захарова А.И. Карты сотрясаемости Узбекистана // Сейсмический режим. Душанбе: Дониш, 1969. С. 99-109.
26. Сейдузова С.С., Захарова А.И. Программа расчета карт сейсмической сотрясаемости // Изучение сейсмической опасности. Ташкент: Фан, 1971. С. 21-28.
27. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР. М.: Наука, 1979. 192 с.
28. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. М.: Наука, 1980. 307 с.
29. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии (Ред. В.И.Уломов), Вып. 1. М.: ОИФЗ РАН, 1993, 303 стр.

30. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии (Ред. В.И.Уломов), Вып. 2-3. М.: ОИФЗ РАН. 1995. 490 стр.
31. Страхов В.Н., Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования Северной Евразии. Физика Земли, №10, 1998. С. 92-96.
32. Уломов В.И. Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. Ташкент: ФАН, 1974, 215 с.
33. Уломов В.И. Тектоника литосферных плит и сейсмогеодинамика // Экспериментальная сейсмология в Узбекистане. Ташкент: Издательство «ФАН» Узбекской ССР. 1983. С. 3-25.
34. Уломов В.И. Решеточная модель очаговой сейсмичности и прогноз сейсмической опасности// Узбекский геологический журнал, 1987. № 6. С. 20–25.
35. Уломов В.И. Землетрясение в Армении: Стихия и ответственность, «Архитектура и строительство Узбекистана», N 12, 1989, С. 1-4.
36. Уломов В.И. Программа исследований по изучению сейсмичности и сейсмическому районированию Северной Евразии. ГНТП "Глобальные изменения природной среды и климата". М.: ИФЗ РАН. 1992. 21 стр.
37. Уломов В.И. Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ОИФЗ РАН, 1993, С. 24–44.
38. Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений. Физика Земли, N 4, 1993, С. 43-53.
39. Уломов В.И. Об основных положениях и технических рекомендациях по созданию новой карты сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 2-3. М.: ОИФЗ РАН, 1995, С. 9–26.
40. Уломов В.И. Региональные структуры сейсмичности // Глава 16, "Современная динамика литосферы континентов. Подвижные пояса" (Ред.Н.А.Логачев, В.С.Хромовских), М: Недра, 1995, С. 401-419.
41. Уломов В.И. Международная программа по оценке глобальной сейсмической опасности (Global Seismic Hazard Assessment Program - GSHAP), Физика Земли, N1, 1993, С. 89-92.
42. Уломов В.И. Оценка сейсмической опасности и временная схема сейсмического районирования Сахалина, // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений, Информационно-аналитический бюллетень Министерства Российской Федерации по чрезвычайным ситуациям, Спец. выпуск, октябрь 1995, "Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995", Москва: МЧС России, Российская Академия наук, 236 стр.
43. Уломов В.И. Межрегиональное рабочее совещание "Методология и алгоритмы изучения региональной сейсмичности и оценки сейсмической опасности в Крым-Кавказ-Копетдагском регионе", Физика Земли, N3, 1995. С. 92-96.
44. Уломов В.И. Картирование очаговых зон землетрясений для сейсмического районирования Северной Евразии", Рабочее совещание по Программе "Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии", Физика Земли, N 9, 1995, С. 93-96.
45. Уломов В.И. Международное рабочее совещание "Исторические и доисторические землетрясения Кавказа", Физика Земли, №3, 1997, С. 95-96.
46. Уломов В.И. Моделирование зон возникновения очагов землетрясений на основе решеточной регуляризации. Физика Земли, N 9, 1998, С. 20-38.

47. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Сейсмическое районирование России на основе автоматизированных технологий // Проект. № 3, 1998. С. 4-8.
48. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект новых карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмостойкое строительство. № 4, 1998. С. 30-34.
49. Федотов С.А., Шумилина Л.С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки // Физика Земли. 1971, № 9. С. 3-16.
50. Форсайт Дж., Мальком М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 280 с.
51. Ципенюк И.Ф. Повреждаемость и надежность крупнопанельных зданий при сейсмических воздействиях // Исследования по сейсмической опасности. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.29. М.: Наука, 1988. С. 141-153.
52. Шебалин Н.В., Мокрушина Н.Г. Оценка качества прогноза мест сильных сотрясений на картах сейсмического районирования СССР // Колебания грунта и сейсмический эффект при сильных землетрясениях. Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1982. Вып.23. С. 97-113.
53. Algermissen S.T., Perkins D.M. A technique for seismic zoning: General considerations and parameters // Proceedings of International Conference for Safer Construction: Research and Application. USA, 1973. P1-15.
54. Algermissen S.T. and Perkins D.M. (1976), A probabilistic estimation of maximum acceleration in the contiguous United States, USGS Open-File Report 76-416.
55. Bender B. and Perkins D.M. SEISRISK III: a computer program for seismic hazard estimation, U.S. Geol. Surv. Bull., 1772, 1987, pp.48.
56. Cornell, C.A. Engineering risk in seismic analysis // Bull. Seism. Soc. Am. 54, 1968, pp. 1583-1606.
57. Global Seismic Hazard Assessment Program. — Annali di Geofisica. Spec. issue: Technical Planning Volume of the ILP's, XXXVI, No. 3-4. 1993. 257 p.
58. Gusev A.A., Pavlov V.M. A computer program risk for estimating seismic intensity recurrence //5th Zonenshain Conference on Plate Tectonics. Moscow, November 22-25, 1995. Program and Abstracts. 129 p.
59. Gusev A.A., Shumilina L.S. Technique of seismic zoning.//5th Zonenshain Conference on Plate Tectonics. Moscow, November 22-25, 1995. Program and Abstracts. P.129.
60. Gusev A.A., Pavlov V.M., Shumilina L.S. An improved technique for determination of seismic hazard // J.of Earthquake Prediction Research. 1999.№ 1 (в печати)
61. Hanks T.C. and Kanamori H. A moment magnitude scale , J. Geophys. Res., 84, 1979, pp. 2348-2350.
62. Kantorovich L.V., Keilis-Borok V.I. and Molchan G.M. (1974), Seismic risk and principles of seismic zoning. Series: Seismic design decision analysis, Department of Civil Engineering, MIT, Internal Study Report N 43, 26 p.
63. McGuire R.K. FORTRAN computer program for seismic risk analysis, U.S.Geol. Surv. Open File Rep., 76-77, 1976, pp.90.
64. Risnichenko Yu.V. Geophysical principles of evaluation of the seismic danger // Papers presented at 9th Assembly of European Seismol.Commission.Kobenhavn, 1967.P.1967.
65. Shapira A. Potential earthquake risk estimations by application of a simulation process.//Tectonophysics. 1983a. V.95. N 1/2. P.75-89.
66. Shapira A. A probabilistic approach for evaluating earthquake risks, with application to the Afro-Eurasian junction //Tectonophysics. 1983b. V.91. N3/4. P.321-334.

67. Shebalin N.V., Ulomov V.I., Tatevossian R.E., Trifonov V.G., Ioffe A.I., Kozhurin A.I. Unified Seismogeological Taxonomy of the Northern Eurasia, IUGG-Abstracts, SB21C-14, Boulder, U.S.A., 1995.
68. Ulomov V.I. Regional seismicity structures and some aspects of seismic zoning in Eurasia, Proceedings of PRC/USSR workshop on Geodynamics and seismic risk assessment, Beijing, China 1991, Seismolog. Press, 1993, pp. 283-301.
69. Ulomov V.I. Structural and dynamical regularity of Eurasia seismicity and some aspects of seismic hazard prediction, // European Seismological Commission, XXIV General Assembly 1994 September 19-24, Athens, Greece, Proceedings and Activity Report 1992-1994, Vol.1, pp. 271-281.
70. Ulomov V.I. On the identification and seismological parameterization of earthquake source zones. The Caucasus and adjacent area //Historical and Prehistorical Earthquakes in the Caucasus (edited by Domenico Giardini and Sergiei Balassanian), NATO ASI, Series 2: Environment - Vol. 28, ILP Publication n.333, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 1997, pp. 503 -522.
71. Wu Shen-Chyun, Cornell C.A. and Winterstein S.R. A hybrid recurrence model and its implication on seismic hazard results. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 85, N1, 1995, pp. 1-16.
72. Wesnousky S.G. Earthquakes, quaternary faults, and seismic hazard in California, Journ. Geophys. Res., 91, 1986, pp. 12587-12631.
73. Youngs R.R. and Coppersmith K.J. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates, Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 1985, pp. 939-964.

Организации – ответственные исполнители исследований по проблеме «Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии» и созданию комплекта карт ОСР-97:

Объединенный институт физики им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (головная организация, Москва), Институт земной коры СО РАН (Иркутск), Объединенный институт геологии и геофизики СО РАН (Новосибирск), Якутский институт геологических наук СО РАН (Якутск), Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (Южно-Сахалинск), Институт вулканологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский), Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский), Северо-восточный комплексный НИИ ДВО РАН (Магадан).

Организации – соисполнители исследований для ОСР-97:

Геофизическая служба РАН, Геологический институт РАН, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Кольский научный центр РАН, Институт геофизики и Горный институт Уральского Отделения РАН, «ВНИИГеофизика» и Нижне-Волжский НИИ геологии и геофизики Министерства природных ресурсов РФ, Воронежский Государственный Университет, Татарское геолого-разведочное управление АО «Татнефть», Центральный НИИ строительных конструкций им. Кучеренко Госстроя РФ, Опытно-методическая экспедиция АН Республики Азербайджан (Баку), Национальная служба сейсмической защиты Республики Армения (Ереван), Институт геологии АН Республики Армения (Ереван), Институт геофизики, геологии и геохимии АН Республики Беларусь (Минск), Институт геофизики АН Грузии (Тбилиси), Институт сейсмологии МН-НАН Республики Казахстан (Алматы), Институт геофизики и геологии АН Республики Молдова (Кишинев), Институт сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикистана (Душанбе), Институт сейсмологии АН Туркменистана (Ашгабад), Институт сейсмологии АН Республики Узбекистан (Ташкент), Институт геофизики АН Украины (Киев).