

ОТ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ К ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ *)

(К 100-летию со дня рождения академика Г.А. Гамбурцева)

В.И. Уломов

Институт физики Земли им. Г.А. Гамбурцева РАН, г. Москва

На пути к прогнозу

Проблема прогноза сильных землетрясений и геодинамического сейсмического районирования в нашей стране систематически начала разрабатываться по инициативе и под руководством Григория Александровича Гамбурцева в 1949 г., сразу же после Ашхабадской катастрофы 1948 г. Уже тогда им были предельно четко сформулированы цели и задачи комплексных исследований по этой важнейшей научной и социальной проблеме.

Являясь основоположником самых современных методов сейсмической разведки земных недр, и прежде всего – корреляционных методов преломленных волн (КМПВ), глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и корреляционных методов изучения землетрясений (КМИЗ), Г.А. Гамбурцев рассматривал природу сейсмических процессов в их неразрывной связи с геологической средой, с ее глубинным строением и динамикой. Он не разделял, а наоборот, как единое целое воспринимал задачи сейсмического районирования и прогноза времени возникновения землетрясений. В рукописи, подготовленной совместно с В.В. Белоусовым для доклада на заседании Президиума АН СССР в 1955 г. он писал: «Прогноз землетрясений имеет две стороны.

1. Прогноз места и силы землетрясений, или сейсмическое районирование. Прогноз должен состоять в предвычислении интенсивности и спектра максимальных сотрясений в функции места по крайней мере на ближайшие 100–200 лет. Данные сейсморайонирования должны лежать в основе проведения антисейсмических мероприятий при городском, сельском и промышленном строительстве.

2. Прогноз времени возникновения землетрясений, в основном крупных землетрясений. Постановка задачи может быть весьма разнообразной. Может идти речь о краткосрочном и долгосрочном прогнозе. Задача прогноза на весьма длительный срок, по существу, является частью задачи сейсмического районирования» [Гамбурцев, 1960, С. 436].

Сегодня эта комплексная проблема сейсмического прогноза рассматривается по схеме, представленной на рис. 1.

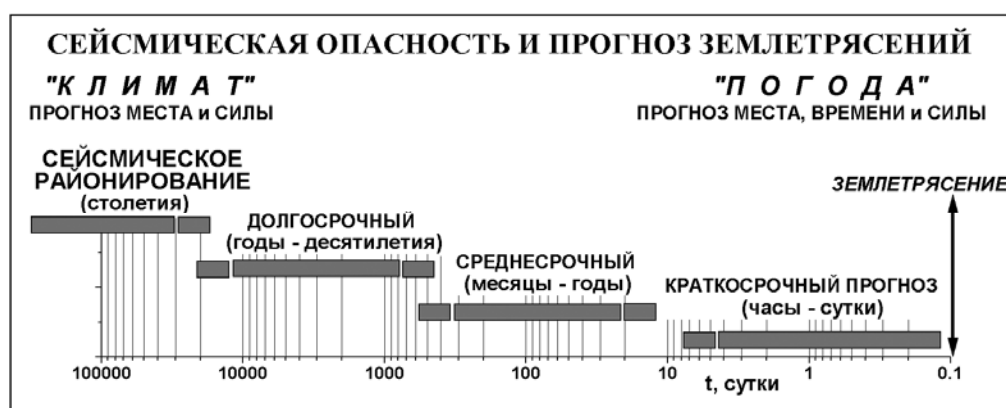


Рис. 1. Типы прогноза сейсмической опасности – сейсмический «климат» и сейсмическая «погода». Вдоль оси абсцисс указано время, измеряемое в сутках. Двойная стрелка – момент возникновения прогнозируемого землетрясения. Горизонтальные отрезки – продолжительность времени (в скобках) ожидания реализации того или иного прогноза.

Подчеркивая необходимость наличия глубокой связи между исследованиями по прогнозу землетрясений и сейсмическим районированием, Г.А. Гамбурцев призывал уделять особое внимание изучению разнообразия сейсмических и тектонических условий в каждом из сейсмоактивных регионов, которые он представлял генетически связанными геологическими структурами.

В 1955 г. в своей статье, посвященной проблеме сейсмического прогноза, он писал: «Данные сейсмологии должны контролироваться и дополняться тектоническим анализом, а также глубинной геофизической разведкой (анализ гравитационных и магнитных аномалий, глубинное сейсмическое зондирование земной коры). Тектонические исследования наряду с сейсмологическими имеют основное значение при сейсмическом районировании крупных территорий... Превалирование сейсмостатистики при современном состоянии сейсмологии является вынужденным. В дальнейшем, по мере накопления наших знаний о природе землетрясений и об условиях их возникновения, роль сейсмостатистики должна уменьшаться и соответственно главное значение должны получить твердо обоснованные физические и геологические критерии сейсмичности» [Гамбурцев, 1955].

Вместе с тем, Г.А. Гамбурцев не приуменьшал значение статистики и ставил во главу угла исследования особенностей сейсмического режима и динамики земной коры. «В отношении прогноза времени возникновения землетрясений, – писал он, – у нас еще нет определенных выводов. Представляется, что эта задача, также как и задача сейсмического районирования, будет решена главным образом на основании изучения сейсмического режима, а также режима медленных колебаний земной коры» [Гамбурцев, 1960, С. 443]. Будучи сторонником геодинамического подхода к изучению сейсмических явлений и указывая на недостатки преобладающих тогда «детерминистских» построений, он умело оперировал современными понятиями вероятностных оценок сейсмической опасности и риска при строительстве в сейсмоактивных регионах страны. Так, по его мнению, «...при проведении практических антисейсмических мероприятий вряд ли следует принимать в расчет землетрясения, вероятность возникновения которых за отрезок времени в 100–200 лет ничтожно мала (например, такое землетрясение, которое может произойти один раз за несколько тысячелетий)» [там же, С. 430].

Приступая в начале 50-х годов прошлого века к разработке КМИЗ и внедряя приемы сейсмической разведки в большую сейсмологию, Г.А. Гамбурцев считал, что «...методы сейсмического районирования, до сих пор в основном геологические, требуют физического обоснования путем совместного изучения землетрясений и строения земной коры на большой глубине» [там же, С. 367]. В своей записке «Проблема прогноза землетрясений», составленной в марте 1954 г., Г.А. Гамбурцев предлагал с целью «установления критериев для прогноза землетрясений» приступить к решению этой проблемы «на новой основе изучения физики единого глубинного процесса развития земной коры» [Гамбурцев, 1955].

Предвосхищая получившие впоследствии широкое распространение представления о фрактальной структуре геологической среды и развивающихся в ней сейсмических процессов, Г.А. Гамбурцев придавал большое значение изучению ее тонкого иерархического строения и явлений миграции сейсмической активизации. Он полагал, «...что большая частота возникновения слабых землетрясений не только делает весьма эффективными сейсмические методы в задаче обнаружения глубинных сейсмогенетических разрывов («сейсмических швов»), но, по-видимому, позволяет увеличить разрешающую способность метода, т.е. способность различать близкие сейсмические швы. Можно предполагать, что жизнь сейсмических швов не постоянна во времени и в пространстве, т.е. могут существовать пространственные и временные флюктуации этой жизни. В один период времени более активен один шов, в другой период может оказаться более активным другой шов» [Гамбурцев, 1960, С. 392]. И далее: «...сильное землетрясение, очаг которого приурочен к одному из мест сейсмического шва, является показателем возможной сейс-

мичности всего шва в целом, а также связанных с ним других швов. После сильного землетрясения, происшедшего в одном месте шва, более вероятно возникновение сильного землетрясения в другом месте шва или в соседнем шве, т.е. вероятен процесс «миграции» очагов сильных землетрясений по системе сейсмических швов. Таким образом, землетрясения не независимы друг от друга: между ними должно существовать известное «сцепление» [там же, С. 428]. «Явления, происходящие в системе генетически связанных сейсмических швов, представляют собой единый сеймотектонический процесс, определяющий как «нормальный» сейсмический режим, так и наиболее важные его особенности – возникновение сильных землетрясений» [там же, С. 429].

К сказанному выше и к другим идеям Г.А. Гамбурцева трудно что-либо добавить. И продлись еще хотя бы на пару десятков лет жизнь этого выдающегося геофизика, значимый прогресс в решении проблемы прогноза землетрясений, несомненно, был бы достигнут. И вряд ли бы появилось впоследствии столько несуразных отклонений от его концепций, столько всякого рода сумасбродных вымыслов (и даже неприкрытой халтуры) в «прогнозировании» землетрясений и в «уточнении» их сейсмической опасности, получивших небывалое развитие особенно теперь, когда на передний план вышли не чистота науки, а неумное стяжательство и стремление к материальной наживе. И хотя уже давно стало очевидным, что прогноз землетрясений, как и районирование сейсмической опасности, без разработки содержательных геодинамических моделей абсолютно бесперспективны, до сих пор некоторыми умельцами без каких-либо разумных концепций продолжают «предсказываться» местоположения потенциальных очагов и максимальных магнитуд возможных в них землетрясений...

Как ни парадоксально, но основополагающие идеи и глубоко продуманные рекомендации, высказанные Г.А. Гамбурцевым в середине прошлого века, а также разработки наиболее выдающегося из его последователей – Ю.В. Ризниченко [Ризниченко, 1965, 1966, 1985], к сожалению, не были в должной мере восприняты и составителями очередных карт общего сейсмического районирования территории бывшего СССР 1968 и 1978 гг. В итоге каждая из этих карт в той или иной мере оказалась неадекватной реальным природным условиям, что наряду с недоброкачественным строительством нанесло народному хозяйству огромный материальный ущерб и повлекло за собой многочисленные человеческие жертвы.

Следуя идеям Г.А. Гамбурцева

Удивительная интуиция этого крупнейшего геофизика и убедительная аргументация предложенной им модели сейсмогенеза сыграли свою заслуженную роль в дальнейшей разработке проблемы геодинамического сейсмического районирования. Представления Г.А. Гамбурцева о взаимосвязи сейсмичности с геоструктурами фактически легли в основу всех наших исследований глубинного строения и динамики земной коры, работ по сейсмическому районированию и прогнозу землетрясений. Для решения этих проблем был развит сейсмогеодинамический подход, рассматривающий сейсмичность как результат деформирования земной коры и всей литосферы с учетом их структурных особенностей, прочностных свойств и процессов разрушения на разных масштабных иерархических уровнях [Уломов, 1974, 1987, 1993 а, б, 1998, 1999]. Была разработана целостная методология общего сейсмического районирования (ОСР) Северной Евразии, созданы однородные сейсмологические и геолого-геофизические электронные базы данных для всей этой обширной территории, охватывающей Россию и другие страны СНГ, а также сопредельные сейсмоактивные регионы [Уломов, Шумилина, 1999–2000].

Как показали исследования, районирование сейсмической опасности и прогноз землетрясений, действительно следует рассматривать как единую систему, охватывающую разномасштабные иерархические уровни сейсмической активизации – глобальный, региональный, локальный и очаговый. Чем крупнее сейсмические очаги и, соответствен-

но, чем выше магнитуда генерируемых ими землетрясений, тем крупнее и объемы геологической среды, ответственные за их подготовку. Поэтому при изучении очаговой сейсмичности, сейсмического режима, как и при оценке сейсмической опасности той или иной территории, всегда необходимо исходить из соответствующих размеров конкретных и генетически взаимосвязанных геоструктур сейсмоактивных регионов. Для наиболее крупных сейсмических очагов протяженность таких геоструктур может достигать нескольких тысяч, а ширина – нескольких сотен километров. Во временном отношении развитие сейсмических и сейсмогеодинамических процессов также исследуется как в долговременном, так и в краткосрочном плане: чем выше магнитуда изучаемых землетрясений, тем больший промежуток исторического и геологического времени следует рассматривать.

В соответствии с новыми представлениями, создана адекватно параметризованная сейсмогеодинамическая (СГД) модель зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ) на всей территории Северной Евразии. Во всех расчетах и построениях на этот раз участвовали не точечные, как прежде, а более реалистичные, протяженные очаги землетрясений, использовались новейшие представления о фрактальности геологической среды и развивающихся в ней геодинамических и сейсмических процессов, о нелинейных и других синергетических явлениях в развитии сейсмогеодинамических структур. В основу СГД-модели зон ВОЗ были положены структурные и геодинамические закономерности, свойственные каждому сейсмоактивному региону и всей обширной территории Северной Евразии, представляющей собой крупнейшую планетарную СГД-систему. Эти закономерности обнаруживаются в иерархической гетерогенности современных тектонических структур, начиная с литосферных плит и кончая блоками земной коры различного ранга, а также в направленности их геодинамического развития.

Показано, что условия неопределенностей, которые в природе всегда существуют, делают неправомочным детерминистский подход к сейсмическому районированию. Оно может быть осуществлено лишь на вероятностной основе. Иными словами, риск всегда будет иметь место, но его необходимо реалистично оценить, и свести к минимуму возможные потери. Поэтому, с учетом выявленных недостатков предыдущих подходов к сейсмическому районированию и в результате собственных исследований, нами было принято решение создавать не одну карту (как это делалось прежде и до сих пор практикуется за рубежом), а комплект вероятностных карт общего сейсмического районирования территории Северной Евразии – ОСР-97, позволяющих оценивать степень сейсмической опасности для объектов разных сроков службы и категорий ответственности на трех уровнях, отражающих расчетную интенсивность сейсмических сотрясений, ожидаемых на данной площади с заданной вероятностью в течение определенного интервала времени [Уломов, Шумилина, 1999-2000].

Не хаос, а порядок

Связь региональной сейсмичности со структурой и динамикой литосферы наиболее ярко выражена в глобальных масштабах [Уломов, 1993 б]. Самыми активными в сейсмическом отношении являются конвергентные структуры взаимодействия литосферных плит, расположенные по периферии океанов в виде зон субдукции, а также в виде реликтов этих зон – на континентах. Конвергентные структуры достаточно хорошо упорядочены по своим размерам и местоположению на поверхности Земли (рис. 2). Среднестатистическая протяженность каждого из таких регионов мира составляет в среднем 3000 ± 500 км. Как выяснилось, размеры этих сейсмоактивных областей и их пространственное распределение имеют самое непосредственное отношение к оценке магнитуды максимальных возможных в их пределах землетрясений, что чрезвычайно важно для сейсмического районирования.

Каждому из таких регионов свойственен свой, характерный для него, сейсмический режим. Поэтому при разработке модели зон ВОЗ именно регионы указанных выше разме-

ров приняты нами за «исходную» сейсмогенерирующую единицу, определяющую сейсмогеодинамику каждого из слагающих регион разломно-блоковых структурных элементов. Обнаруженные закономерности в значительной мере явились основой и для деления территории Северной Евразии на однородные в сейсмогенетическом отношении регионы.

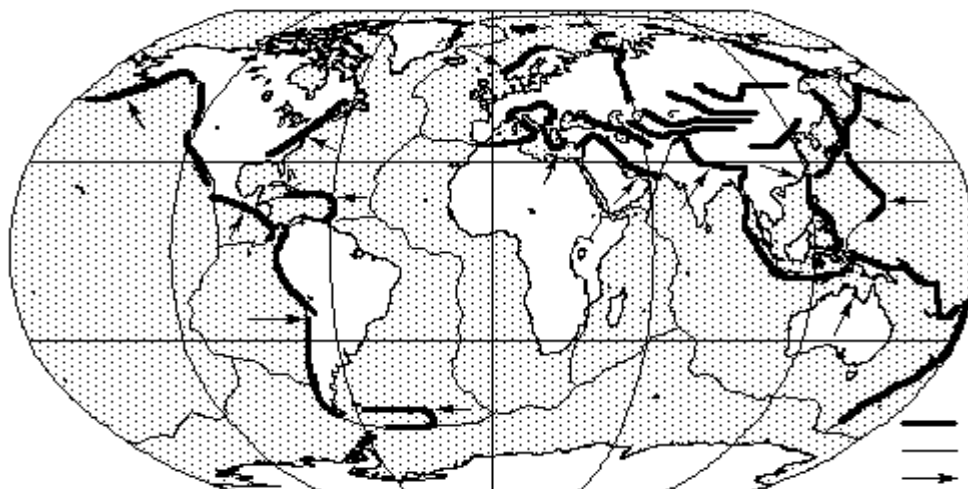


Рис. 2. Глобальная упорядоченность сейсмогенерирующих региональных структур: 1. – оси конвергентных (сходящихся) зон субдукции и их реликтов на континентах; 2. – оси дивергентных (расходящихся) рифтовых зон; 3. – направления перемещения основных литосферных плит.

С геологической точки зрения, Северная Евразия включает в себя четыре крупные платформы разного возраста (Восточно-Европейская, Западно-Сибирская, Турано-Скифская, Сибирская), характеризующиеся относительно слабой и рассеянной сейсмичностью, и ряд орогенических регионов с чрезвычайно высокой сейсмической активностью и достаточно четкой структурой сейсмичности (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 сейсмоактивным регионом Северной Евразии. Здесь возникают самые крупные землетрясения и высвобождается основная доля СГД-деформаций на рассматриваемой территории. Очаги с промежуточной глубиной залегания (от 70 до 300 км) свойственны двум другим хорошо выраженным следам субдукции: Вранчу – в Восточных Карпатах и Памиро-Гиндукушу – в Центральной Азии. Подкорковые очаги землетрясений наблюдаются в реликтовой зоне субдукции в акватории Среднего Каспия и на Северном Кавказе. Преобладающее же число сейсмических очагов расположено в верхней части земной коры на глубинах до 15 км. Из-за относительно небольшой глубины залегания такие очаги являются наиболее опасными в сейсмическом отношении.

Как выяснилось, реальная частота возникновения крупных землетрясений в каждом из регионов Северной Евразии оказалась в три и более раз выше, чем это считалось прежде. Использование же в прошлые годы идеализированных, логарифмически прямолинейных, графиков повторяемости землетрясений приводило к существенному занижению сейсмической опасности практически во всех регионах бывшего СССР.

В значительной степени упорядочена и региональная структура сейсмичности. Было обнаружено, что расстояния между дислокационными узлами пересекающихся разломов и, соответственно, размеры образованных ими геоблоков, имеют ярко выраженную тенденцию группироваться по рангам, примерно удваивая от ранга к рангу свои размеры в плане и по глубине [Уломов, 1987, 1993 б, 1998]. 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, верхняя граница «базальтового» слоя – на 20-25 км, подошва земной коры – на 40-50 км, подошва литосферы на глубине около 100 км, астеносферы – около 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 даже почвы.

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 линеamentным (прямолинейным или почти прямолинейным) 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.

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, ранжированных по интервалам магнитуд и излучаемой ими упругой энергии, распределены закономерно не только во времени («закон повторяемости землетрясений»), но и в пространстве («закон дистанцирования сейсмических очагов»). Как оказалось, и в этой иерархии в основании всех функциональных степенных зависимостей лежит всё та же «загадочная двойка». Так, среднестатистические размеры (протяженность) очагов землетрясений, «квантованных» по 0,5 единицы магнитуды, и расстояния между эпицентрами ближайших пар таких очагов изменяются примерно в два раза с каждым шагом в половину магнитуды. Например, протяженность очагов землетрясений, имеющих магнитуду $M=6.5$, составляет около 25 км, с $M=7.0$ – ≈ 50 км, с $M=7.5$ – ≈ 100 км, с $M=8.0$ – ≈ 200 км и т.д. При этом величины межэпицентральных расстояний, обусловленные размерами соответствующих геоблоков, примерно в четыре раза превышают размеры очагов, а отношения этих величин друг к другу не зависят от магнитуды, т.е. по отношению к ней являются инвариантами, отражая тем самым самоподобие (фрактальность) в иерархии размеров взаимодействующих геоблоков и очагов землетрясений. Инвариантами по отношению к магнитуде в определенной мере являются и соотношения длины сейсмических очагов с их вертикальной протяженностью, обусловленной толщиной соответствующих геоблоков.

Упорядоченным образом представлена и иерархия солитоноподобных («уединенных») деформационных волн сейсмической активизации – геонов (в терминологии автора), обеспечивающих динамику взаимодействующих геоблоков и направленность развития синергетических СГД-процессов [Уломов, 1993 а]. Распространяясь вдоль разломов соответствующего ранга, геоны создают и разрушают разнообразные зацепы, провоцируя тем самым очаги землетрясений соответствующих магнитуд. Поскольку эти геодинамические процессы развиваются на каждом иерархическом масштабном уровне, им свойственна та же упорядоченность и фрактальная размерность, что и самой слоисто-блоковой среде.

Модель источников землетрясений

Взаимосвязь во фрактальной упорядоченности разломов, геоблоков и сейсмических очагов, а также в развитии СГД-процессов, была положена в основу предложенной автором в 1987 г. фрактальной решеточной модели (РМ) сейсмогенеза [Уломов, 1987]. Эта

модель позволила по-новому подойти к идентификации и сейсмологической параметризации зон возникновения очагов землетрясений для задач сейсморайонирования. В основу создания модели зон ВОЗ для сейсмического районирования Северной Евразии была положена линеаментно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель, явившаяся дальнейшим развитием РМ-модели [Уломов, 1998].

В соответствии с принятой концепцией, в ЛДФ-модели (рис. 3) рассматриваются четыре масштабных уровня источников землетрясений – крупный регион упоминавшихся выше размеров с интегральной (и поэтому наиболее достоверной) характеристикой сейсмического режима, и три его основных структурных элемента: линеаменты, в генерализованном виде представляющие оси трехмерных сейсмоактивных разломных структур, отражая структурированную сейсмичность и являясь основным каркасом ЛДФ-модели; домены, охватывающие квазиоднородные в геодинамическом отношении объемы геологической среды и характеризующиеся рассеянной сейсмичностью; потенциальные очаги землетрясений, указывающие на наиболее опасные участки линеаментных структур. «Движущей силой» в ЛДФ-модели зон ВОЗ остаются вышеупомянутые геоны, способствующие перемещению крыльев разломов и сдвиговых структур.

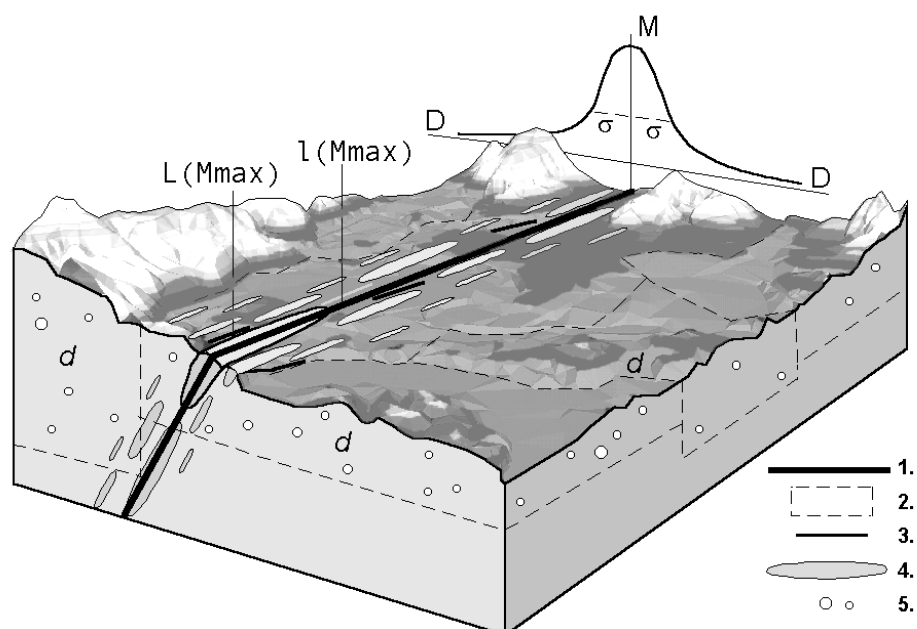


Рис. 3. Иллюстрация ЛДФ-модели зон ВОЗ. 1. – осевые плоскости линеаментных структур; 2. – контуры объемных доменов; 3. – активные разломы, фрагментарно отражающие простирание линеаментов; 4. – очаги землетрясений с $M=7.0$ и более, отклоняющиеся от осевой линии линеаментов на величину D , обратно пропорциональную магнитуде M землетрясений (см. график на заднем плане); 5. – очаги землетрясений с $M=5.5$ и менее, рассеиваемые случайным образом в доменах.

Линеаменты, домены и потенциальные очаги, как и сами землетрясения, классифицируются по величине максимальной магнитуды (M_{max}) с шагом 0.5 её единицы. Минимальное значение магнитуды землетрясений, возникающих вдоль соответствующих линеаментов, составляет $M=6.0$, поскольку в масштабе генерализованного сейсмического районирования, каким является ОСР, очаги с меньшей магнитудой выделяются менее надежно. В случае же детального сейсмического районирования (ДСР) какого-либо из фрагментов территории ОСР нижний порог магнитуд может быть понижен. Максимальная возможная магнитуда (M_{max}) обусловлена реальной сейсмогеодинамической обстановкой, а минимальное значение магнитуды рассматриваемых землетрясений (M_{min}) определяется минимальным уровнем сейсмической опасности, учет которого необходим для строитель-

ных объектов. В наших исследованиях по ОСР-97 принято $M_{\min}=3.5$, а сейсмическая интенсивность $I_{\min} = V$ баллов.

Поскольку реальные очаги не располагаются строго вдоль осей линеаментов, а отклоняются от них по обе стороны определенным образом, обусловленным иерархическим ветвлением разломов, нами получены среднестатистические значения таких отклонений. Чем меньше магнитуда землетрясений, тем дальше от оси линеамента могут отклоняться их очаги (см. рис. 3). Такое рассеяние очагов обусловлено размером областей динамического влияния линеаментных структур на прилегающую геологическую среду и, как уже сказано, их фрактальным строением.

В общей сложности на территории Северной Евразии выделено более 1000 линеаментных структур и около 500 доменов. Примечательно, что распределение числа линеаментов разного ранга (разной магнитуды M_{\max}) в регионах Северной Евразии в целом отражает фрактальную размерность всего иерархического множества линеаментов, совпадающую с наиболее распространенной средней величиной угла наклона графиков повторяемости землетрясений ($b = -0.9$). Более того, обе группы кривых подобны и по своей конфигурации (частота «встречаемости» крупных разломов так же повышена, как и повторяемость крупных землетрясений), что еще раз подтверждает правомочность развиваемой нами концепции о структурно-динамическом единстве геофизической среды и протекающих в ней сейсмических процессов, а следовательно, и реалистичность созданной ЛДФ-модели зон ВОЗ Северной Евразии.

Для того, чтобы модель «заработала», она соответствующим образом параметризуется: для каждого линеамента и его сегментов, как и для доменов, и потенциальных очагов землетрясений, определяется свойственный им поток сейсмических событий разных магнитуд. Исходными данными, как уже отмечалось, является долговременный сейсмический режим всего рассматриваемого региона. Региональный поток сейсмических событий с $M \geq 6.0 \pm 0.2$ нормируется на единицу времени (обычно, на год) и распределяется между всеми генетически связанными линеаментами пропорционально их протяженности и в соответствии с их рангом (M_{\max}). При этом линеаменты с M_{\max} «принимают на себя» и соответствующий поток событий с $M < M_{\max}$, вплоть до $M=6.0$. Скорость потока сейсмических событий в каждом из доменов определяется более простым способом – на основе выборки всех событий с $M \leq 5.5$, происходящих в пределах домена, и расчета графика их повторяемости. Для слабоактивных и асейсмичных в настоящее время доменов применяются экспертные оценки. Потенциальные очаги параметризуются как дополнительные сегменты линеаментов и на них распространяется поток сейсмических событий только соответствующий их рангу (M_{\max}). Если же, в качестве проверки, сложить все нормированные на год потоки сейсмических событий, вычисленных для каждого из структурных элементов этой ЛДФ-модели, то вновь получим исходную характеристику сейсмического режима всего соответствующего региона.

Полученные таким образом характеристики сейсмического режима всех структурных элементов региона используются затем при моделировании прогнозной (виртуальной) сейсмичности, положенной в основу расчетов сейсмической сотрясаемости и сейсмического районирования.

Виртуальная сейсмичность и расчет сейсмической опасности

Ниже, на примере Иран-Кавказ-Анатолийского региона, иллюстрируется процедура построения карт виртуальной сейсмичности и расчета сейсмической опасности на основе адекватно параметризованной региональной ЛДФ-модели.

ЛДФ-модель, изображенная на рис. 4 (в середине слева), создана на основе реально наблюдаемой сейсмичности (слева вверху), а также разного рода геолого-геофизических данных, сведений о сейсмотектонике и сейсмогеодинамике этого региона. Здесь показаны линеаменты с $M_{\max} \leq 8.5 \pm 0.2$, $\leq 8.0 \pm 0.2$, $\leq 7.5 \pm 0.2$, $\leq 7.0 \pm 0.2$, $\leq 6.5 \pm 0.2$ и 6.0 ± 0.2 . Знак \leq указы-

вает на то, что каждый из линеаментов с M_{\max} включает в себя и все менее крупные разломные структуры и, как уже отмечалось, генерирует также землетрясения меньших магнитуд, вплоть до $M=6.0$. Толщина линий (1), имитирующих линеаменты, уменьшается в два раза с уменьшением на 0.5 единицы M_{\max} . Тонкими линиями оконтурены домены (d), имеющие различные значения $M_{\max} \leq 5.5$. На этом же рисунке показан потенциальный очаг землетрясения (s), выявленный по палеосейсмологическим данным.

Нижний левый рисунок иллюстрирует пример прогнозной сейсмичности для этого же региона, полученной путем компьютерной генерации виртуальных очагов землетрясений, основанной на синтетическом каталоге, созданном в соответствии с долговременным сейсмическим режимом в регионе и сейсмологической параметризацией ЛДФ-модели всех зон ВОЗ региона. Виртуальные очаги показаны здесь в виде реально ориентированных прямоугольников, спроецированных на земную поверхность. Протяженность прямоугольников отвечает протяженности очагов виртуальных землетрясений соответствующих магнитуд (в данном случае $M \geq 5.0$), а их ориентация и ширина зависят от ориентации и угла наклона плоскости соответствующего линеаменты. Карта виртуальных очагов иллюстрирует одну из случайных выборок для 100-летнего временного интервала, примерно отвечающего протяженности во времени каталога реальных сейсмических очагов, изображенных выше. Обычно число выборок насчитывает несколько десятков, в то время как временной интервал определяется в зависимости от заданной вероятности превышения (или не превышения) ожидаемого сейсмического эффекта.

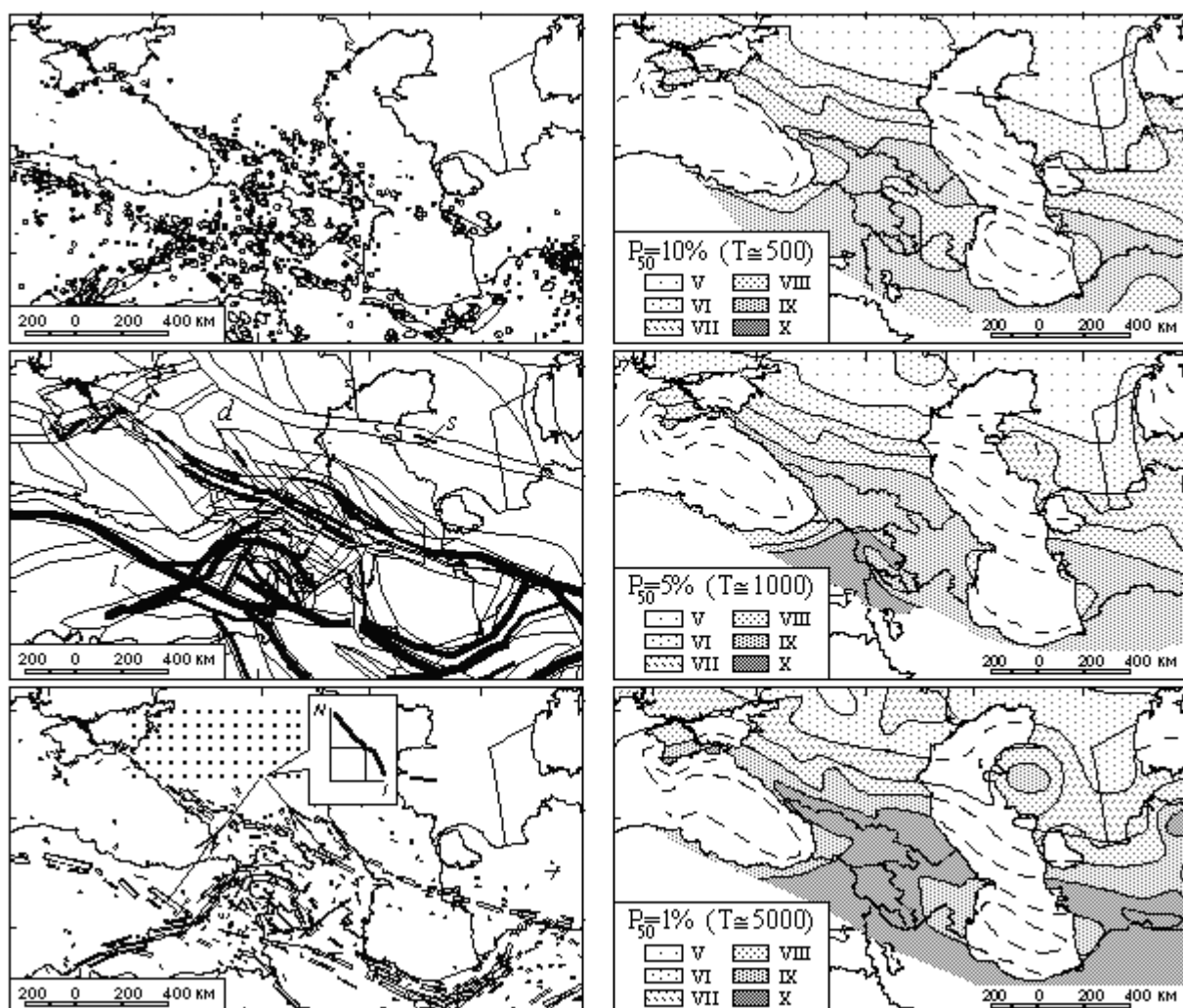


Рис. 4. Иллюстрация реальной сейсмичности и процедуры создания карт зон ВОЗ, виртуальной сейсмичности и сейсмического районирования Иран-Кавказ-Анатолийского региона. Пояснения в тексте.

Сравнивая виртуальную сейсмичность с реальной, легко убедиться в подобии этих карт, что еще раз подтверждает реалистичность ЛДФ-модели зон ВОЗ этого региона.

Вычисление сейсмического эффекта осуществляется для каждого узла прямоугольной сетки размером $25 \times 25 \text{ км}^2$ (или другим, в зависимости от желательной детальности построений), сплошь покрывающей регион и смежные с ним области. Для всей территории Северной Евразии таких узлов оказалось свыше сотни тысяч. Затем, «опрашивая» каждый из виртуальных очагов и учитывая затухание сейсмического эффекта с расстоянием, для каждого узла сетки в памяти компьютера создается гистограмма нормированной на год частоты N проявления той или иной сейсмической интенсивности I . Одна из таких гистограмм и фрагмент узлов сетки показаны на карте виртуальной сейсмичности.

Гистограммы являются основой для расчетов и последующего картирования периодов повторяемости сейсмических воздействий разной балльности и сейсмической опасности. Так, задаваясь тем или иным значением периодов повторяемости $T = 1 / N$ (например, $T = 500, 1000$ и 5000 лет), можно получить соответствующие карты сейсмического районирования рассматриваемой территории, показанных на рис. 4, справа. Фиксируя же то или иное значение сейсмической интенсивности (балльности), можно построить карты периодов её повторяемости («сотрясаемости», по Ю.В. Ризниченко [Ризниченко, 1965, 1966, 1985]).

В принципе можно составлять карты не только в целочисленном, но и в дробном выражении балльности, что, например, важно при сейсмическом микрорайонировании (СМР) конкретных локальных территорий, когда в таких же долях балла вычисляются и приращения балльности, а затем уже результирующие величины округляются до целых значений баллов. Точно так же можно использовать тонкую структуру периодов повторяемости той или иной целочисленной сейсмической интенсивности для уточнения сейсмической опасности и риска в пределах зон одной и той же балльности, где она целиком «приписана» какому-то одному, фиксированному, периоду повторяемости сейсмической интенсивности (например, один раз в $500, 1000$ или 5000 лет). Благодаря такому подходу, например, в пределах одной и той же зоны балльности можно выделять участки с более редкой повторяемостью таких сейсмических воздействий, т.е. менее сейсмоопасные, что в свою очередь можно использовать при расчетах на сейсмостойкость строительных объектов, как бы вводя дробные баллы, и т.п.

Сейсмическое районирование Северной Евразии

Аналогичные построения выполнены для каждого из регионов и для всей обширной территории Северной Евразии [Уломов, Шумилина, 1999–2000].

Впервые сейсмическим районированием были охвачены слабоактивные равнинные регионы и шельфы внутренних и окраинных морей. Были выявлены многочисленные недостатки прошлой карты общего сейсмического районирования территории бывшего СССР – ОСР-78 (рис. 5). Среди них – искусственное и некорректное изображение на одной и той же карте различных периодов повторяемости той или иной сейсмической интенсивности (на этой карте $T = 100, 1000$ и 10000 лет). Как показали исследования, карта ОСР-78 на самом деле и не была «общей», поскольку составлялась из разрозненных фрагментов, созданных в разных республиках и регионах на основе разнородных исходных данных и различной, не всегда понятной, методики. Например, единый в сейсмогенетическом и сейсмогеодинамическом отношении Иран-Кавказ-Анатолийский регион, протяженностью около 3000 км (см. рис. 4), был искусственно (административно) разделен на части, каждая из которых исследовалась «самостоятельно» сейсмологами каждой из шести бывших союзных республик (Азербайджан, Армения, Грузия, Туркмения, Украина и РСФСР – Северный Кавказ). Отсюда и результаты.

Карта ОСР-78 оказалась самой «небезучей» из всех предыдущих официальных карт сейсмического районирования выпуска 1937, 1957 и 1968 гг. Так, в течение относительно короткого отрезка времени одно за другим произошли разрушительные землетрясения, на 2–3 балла превысившие сейсмическую интенсивность, указанную на карте ОСР-78 (см. рис. 5, левый верхний угол). Это – Спитакское землетрясение 1988 г. в Армении, Зайсанское 1990 г. – в Казахстане, Рачинское 1991г. – в Грузии, Сусамырское 1992 г. – в Киргизии, Хаилинское 1991 г. и Нефтегорское 1995 г. – в России (в Корьякии и на Сахалине).

Основываясь на разработанной нами новой методологии, используя технологию современных геоинформационных систем (ГИС) и созданную мощную цифровую базу однородных исходных данных, нами было создано пять карт с разной степенью вероятности (39%, 10%, 5%, 1% и 0.5%) возможного превышения сейсмической интенсивности в течение 50 лет, что соответствует периодам повторяемости сейсмических воздействий, примерно, один раз в 100 лет (карта ОСР-97-0), в 500 лет (карта ОСР-97-В), 5000 лет (карта ОСР-97-С) и 10000 лет (карта ОСР-97-Д).

От карты с периодом повторяемости в 100 лет пришлось отказаться по причине ее относительно высокого риска. Карта ОСР-97-Д предназначена для безопасного размещения таких чрезвычайно ответственных объектов, какими являются атомные станции и другие экологически и социально опасные строительные объекты.

В комплект ОСР-97, рекомендованный Госстроем России к применению в практике гражданского и промышленного строительства, впервые вошли все три (а не одна, как прежде) карты ОСР-97(А, В и С), предназначенные для сейсмостойкого строительства объектов разных категорий ответственности и сроков службы [Уломов, Шумилина, 1999-2000].

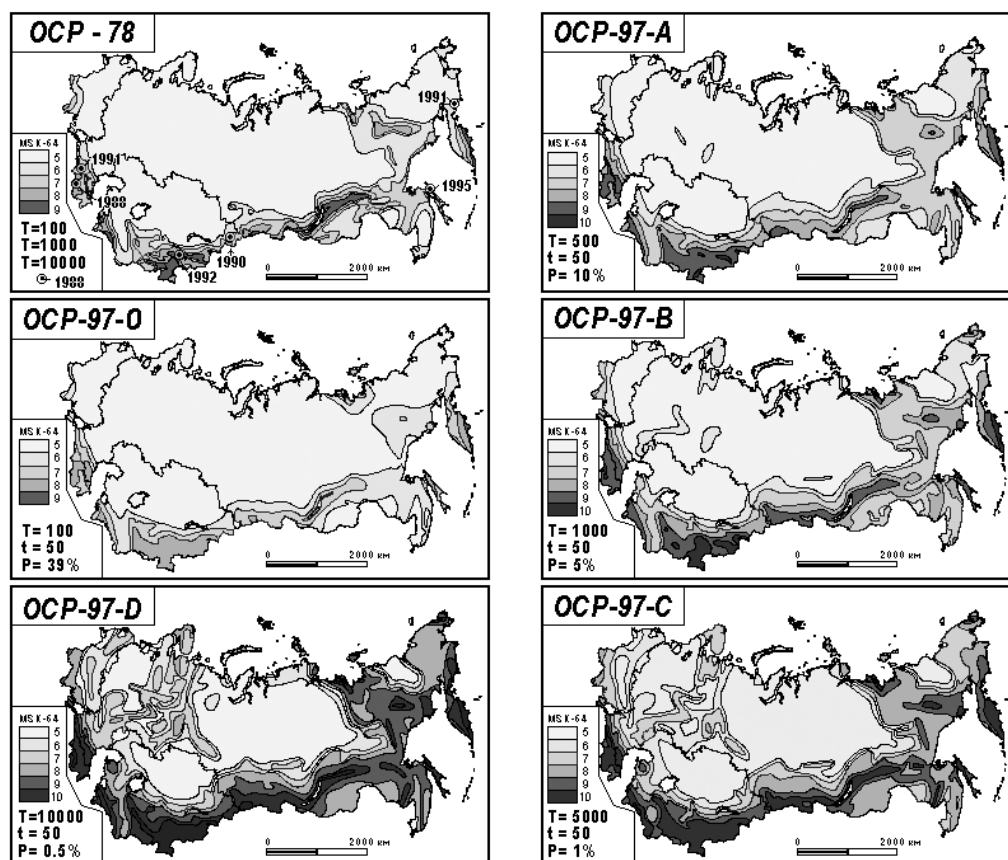


Рис. 5. Карты сейсмического районирования территории Северной Евразии (в границах бывшего СССР), созданные в 1978 г. и в 1997 г.

Согласно новой редакции Строительных норм и правил (СНиП) «Строительство в сейсмических районах», карта ОСР-97-А рекомендуется для использования при массовом промышленном и гражданском строительстве. Карты ОСР-97-В и ОСР-97-С предназначены для проектирования и строительства объектов повышенной ответственности (здания и сооружения, эксплуатация которых необходима при землетрясении или при ликвидации его последствий – системы энерго- и водоснабжения, пожарные депо, сооружения связи; здания с одновременным пребыванием в них большого числа людей – вокзалы, аэропорты, театры, цирки, концертные залы, крытые рынки, спортивные сооружения; больницы, школы, дошкольные учреждения; здания высотой более 16 этажей; другие здания и сооружения, отказы которых могут привести к тяжелым экономическим, социальным, экологическим последствиям и т.п.).

Новые карты сейсмического районирования территории Российской Федерации не только концептуально отличаются от всех карт, созданных в прежние годы, но и не имеют пока прецедента использования всего комплекта (а не одной карты) в мировой практике сейсмостойкого строительства. Благодаря конкретным вероятностным оценкам, эти карты впервые позволили реалистично оценивать степень сейсмического риска на конкретных территориях и для конкретных объектов.

Методология составления карт ОСР-97 получила международное признание, а карта ОСР-97-А всей Северной Евразии, представленная нами в пиковых ускорениях колебаний грунта, вошла составной частью в опубликованную в 1999 г. под эгидой ООН мировую карту глобальной сейсмической опасности (Global Seismic Hazard Map).

Долгосрочный прогноз землетрясений

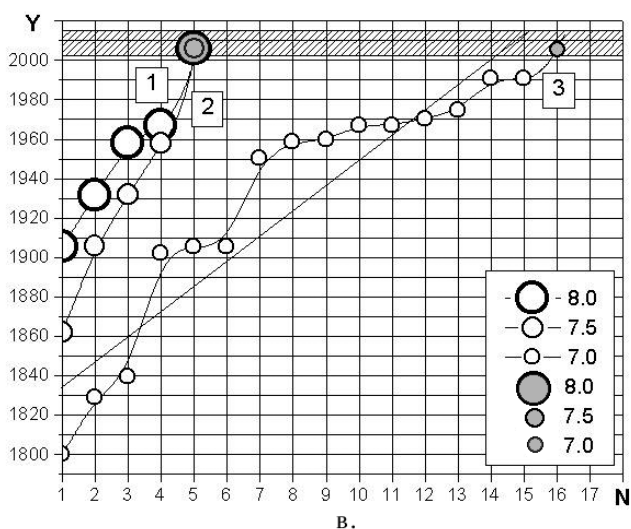
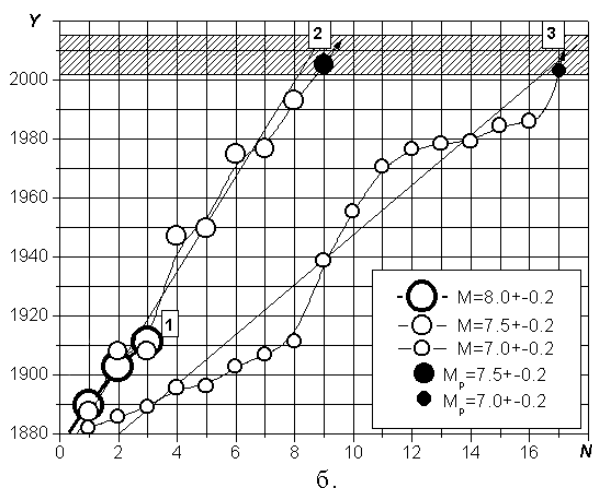
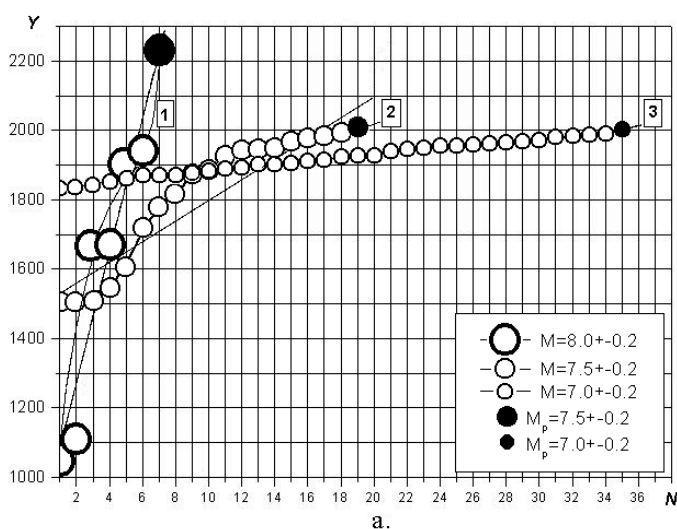
Как справедливо отмечал Г.А. Гамбурцев, прогноз времени возникновения сильных землетрясений нельзя рассматривать отдельно от сейсмического районирования сейсмоактивных регионов, а тем более в отрыве от их геодинамических моделей. Ниже, в качестве примера, рассмотрим лишь часть проблемы долгосрочного прогноза времени возникновения очередных крупных землетрясений, касающуюся региональных оценок.

На рис. 6 представлены последовательности землетрясений в интервалах магнитуд $M=8.0\pm 0.2$ (1), $M=7.5\pm 0.2$ (2) и $M=7.0\pm 0.2$ (3), произошедших на территории Иран-Кавказ-Анатолийского (а), Тянь-Шаньского (б) и Алтай-Саян-Байкальского (в) регионов. Вдоль оси ординат (Y) отложены годы, вдоль оси абсцисс – порядковые номера (N) землетрясений в каждой из этих хронологических последовательностей. Прямые линии аппроксимируют всю совокупность событий соответствующих магнитуд, а кривые получены на основе интерполяции В-сплайнами соответствующих исходных данных. Если бы сейсмические события возникали равномерно во времени, то все они располагались бы строго вдоль прямых линий и предсказывать время возникновения очередных землетрясений было бы не очень сложно. Реальная же картина, хотя и не столь идеальна, но и она характеризуется ярко выраженными закономерностями.

Наиболее представительной является информация о сейсмичности Иран-Кавказ-Анатолийского региона, где статистика крупных сейсмических событий гораздо богаче, чем в двух других регионах. Так, о землетрясениях с $M=8.0\pm 0.2$ здесь достоверно известно почти за 2000 лет, о землетрясениях с $M=7.5\pm 0.2$ имеются достаточно надежные сведения за 500 лет, а о событиях с $M=7.0\pm 0.2$ – за последние 200 лет. Поэтому и масштаб времени по оси ординат выбран более уплотненным по сравнению с двумя другими графиками.

Примечательно, что для магнитуд $M=8.0\pm 0.2$ отчетливо наблюдаются «парные» землетрясения (1 на рис. 6 а), а «синусоидальная» сплайновая кривая описывает события с $M=7.5\pm 0.2$ (2 на рис. 6 а). Землетрясения с $M=7.0\pm 0.2$ (3 на рис. 6 а) происходят достаточно равномерно во времени, хотя при увеличении развертки вдоль оси ординат и здесь можно заметить некоторую «синусоидальность».

Экстраполируя сплайновые линии «в будущее», до их пересечения с вертикалью над соответствующим порядковым номером N , можно полагать, что потенциальное землетрясение с $M_p=8.0\pm 0.2$ случится в Иран-кавказ-Анатолийском регионе где-то в районе 2200 г. (пересечение с вертикалью $N7$, на рис. 6 а), а землетрясения с $M_p=7.5\pm 0.2$ и $M_p=7.0\pm 0.2$ уже давно в этом регионе «созрели» (черные кружки на ординатах $N19$ и $N35$, соответственно).



В Центрально-Азиатском регионе (рис. 6 б) также наблюдается упорядоченность сейсмических событий. Плотная группа самых крупных землетрясений с $M=8.0\pm 0.2$ имела место в течение относительно короткого интервала времени – с 1889 г. по 1911 г. (1 на рис. 6б). С тех пор, уже более 90 лет, таких землетрясений в Центральной Азии не возникало и что-либо говорить о времени очередных подобных событий в этом регионе пока затруднительно.

Что касается двух других последовательностей землетрясений с $M=7.5\pm 0.2$ и $M=7.0\pm 0.2$ (соответственно 2 и 3 на рис. 6 б) в этом регионе, то здесь закономерность появления событий выглядит достаточно ярко. Времена возникновения землетрясений с $M=7.5\pm 0.2$, незначительно отклоняясь от аппроксимирующей их прямой, в своем большинстве группируются по два события в три группы. Слегка волнистая сплайновая кривая (2) изменяет угол наклона в небольших пределах. Наиболее синусоидальной выглядит цепочка событий с $M=7.0\pm 0.2$ (3 на рис. 6 б). Здесь «синусоида» имеет почти 100-летний период и амплитуду, соответствующую, примерно, 15-летнему интервалу времени по отношению к аппроксимирующей прямой, которая может быть принята за ось этой «синусоиды».

Рис. 6. Последовательности (N) землетрясений с $M=8.0\pm 0.2$, 7.5 ± 0.2 и 7.0 ± 0.2 во времени (Y , годы) в Иран-Кавказ-Анатолийском (а),

Центрально-Азиатском (б) и Алтай-Саян-Байкальском (в) регионах Северной Евразии. Пояснения в тексте.

Экстраполируя сплайновые линии, можно полагать, что очередное землетрясение с $M_p=7.5\pm 0.2$ на рассматриваемой территории произойдет в интервале 2002–2015 гг. (N9 на рис. 6 б), а с $M_p=7.0\pm 0.2$ (N17) – в ближайшие 10 лет. Заштрихованной горизонтальной полосой помечен наиболее вероятный интервал времени возникновения таких землетрясений.

Не менее тревожная ситуация сложилась в Алтай-Саян-Байкальском регионе. Здесь уже давно ожидаются весьма крупные землетрясения с магнитудами $M_p=7.0\pm 0.2$, 7.5 ± 0.2 и даже с $M_p=8.0\pm 0.2$ [Уломов, 1993]. Наиболее вероятное время их возникновения показано на рис. 6 в серыми кружками, а интервал повышенной опасности выделен заштрихованной полосой. Однако сказать, в каком конкретном месте произойдут эти события, пока невозможно. Скорее всего, их локальными предвестниками будут микроземлетрясения и деформации земной поверхности, за которыми чрезвычайно важно организовать тщательные наблюдения, в том числе с помощью локальных сетей высокочувствительных сейсмических станций и GPS-технологий.

Как показывают исследования, упорядоченный характер развития сейсмических процессов, проявляющийся, в частности, в синусоидальной форме функциональных кривых, описывающих последовательности сейсмических событий, свидетельствует о существовании сверхдлиннопериодных деформационных волн, охватывающих целые регионы.

Что дальше?

Дальнейшее изучение современной геодинамики и особенностей развития сейсмических процессов в генетически связанных геоструктурах сейсмоактивных регионов, как и в самих сейсмических очагах, позволит внести очередной вклад в развитие представлений о сейсмогенезе, в совершенствование сейсмогеодинамических моделей, методов сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений. Об этом, в частности, свидетельствуют выявленные нами ранее закономерности в динамике земной коры и в проявлении сейсмичности в периоды подготовки двух крупнейших землетрясений, случившихся в Центральной Азии в последнюю четверть прошлого века [Уломов, 1974; Уломов, Полякова, Медведева, 2002]. Детальные исследования пространственно-временных и энергетических характеристик сейсмических процессов дадут возможность более надежно идентифицировать потенциальные очаги и определять повторяемость землетрясений в каждом из них, а не только во всем регионе. Это в свою очередь позволит по-новому оценивать сейсмическую опасность (или безопасность) на достаточно локализованных участках и создавать карты динамического сейсмического районирования, отличающиеся от существующих большей дифференциацией и элементами долгосрочного прогноза сильных землетрясений в конкретных местах региона.

Возможно, что это также имел в виду академик Г.А. Гамбурцев в одной из последних своих статей о перспективах работ в области прогноза землетрясений. «Сейсмическое районирование, – писал он, – служит в основном для определения характера антисейсмических мероприятий при строительстве в сейсмических районах. В связи с этим основной задачей в данной области является долгосрочный прогноз (на 100–200 лет вперед) балльности наиболее сильных землетрясений в функции места. Решение этой задачи требует абсолютного и количественного подхода к прогнозу землетрясений. Так как возможности такого подхода ограничены, то приобретает практическое значение другая, относительно качественная задача, а именно: сравнительная качественная оценка степени сейсмической опасности различных участков районированной территории. Ее решение может быть полезно в первую очередь для выделения на картах сейсмического районирования, внутри зон одинаковой балльности,

наиболее благоприятных в сейсмическом отношении участков для размещения строительства тех или иных сооружений» [Гамбурцев, 1955].

Важную роль в дальнейших исследованиях по сейсмическому районированию и прогнозу сильных землетрясений должны сыграть современные методы спутниковых наблюдений, в частности с помощью GPS-технологий, и организация специального сейсмического мониторинга в основных сейсмоактивных регионах страны. Такой мониторинг, наряду с регистрацией микроземлетрясений, непременно должен включать в себя и аппаратуру для получения записей сильных колебаний почвы, что в свою очередь необходимо для создания более информативных для инженерных целей карт районирования спектральных сейсмических воздействий.

В заключение, в порядке размышления, следует признать важность разработки фундаментального вероятностного системного подхода к созданию полноценной геодинамической модели, адекватной реальным природным условиям, отражающей структуру среды и динамических связей в ней, выявляющую ее элементы и подсистемы, обнаружившую в них ту или иную симметрию и т.д.

Существующие сейчас геодинамические модели, при всей их прогрессивности, всё же далеки от совершенства. Они не раскрывают всего многообразия вероятностно-детерминистских дискретных взаимодействий в сложной иерархической структуре геоблоков и очагов землетрясений. Вместе с тем, известно, что сосуществование случайного и необходимого в таких неравновесных и неустойчивых диссипативных системах, какой является открытая для внешних силовых воздействий фрактальная слоисто-блоковая геофизическая среда, приводит к возникновению упорядоченных энергетических и пространственно-временных структур сейсмичности в макроскопических масштабах.

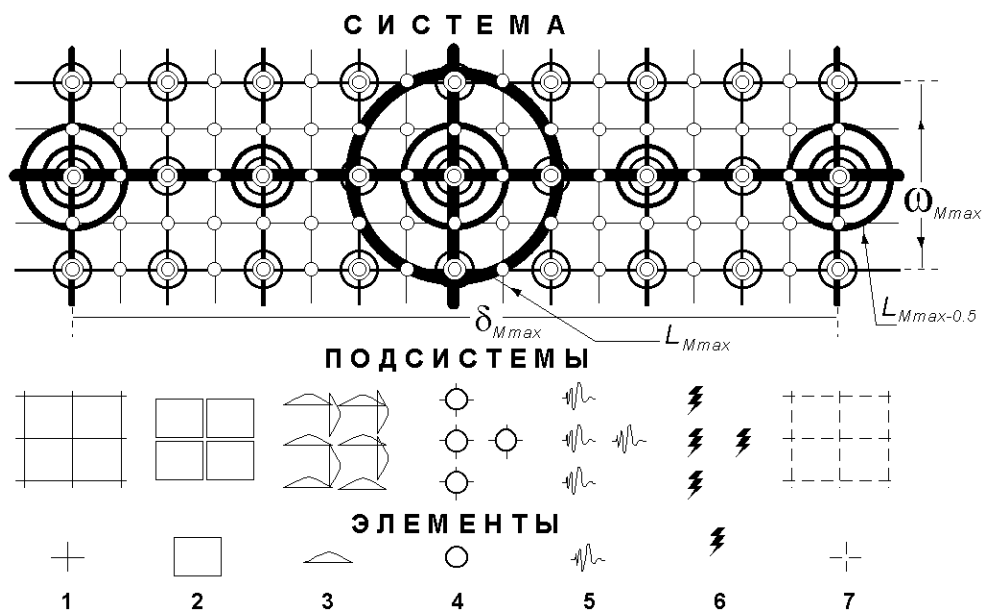


Рис. 7. Одна из возможных моделей многоэлементной структуры системы сейсмогенеза. Пояснения в тексте.

Как показали наши исследования, фрактальная структура литосферы обуславливает её особую реакцию на деформационные воздействия. Так, если эти воздействия слабые, то сейсмический режим в регионе квазистационарен и характеризуется хаотическим возникновением слабых землетрясений. При увеличении вынуждающих сил СГД-система переходит в качественно новое и более организованное состояние. На макроскопическом уровне возникает самоорганизация, обусловленная

кооперативным взаимодействием иерархии геоблоков, очагов землетрясений и деформационных процессов. В результате формируются деформационные волны – геоны, имеющие солитонную природу и распространяющиеся в межблочных швах фрактально построенной литосферы. Эти волны играют существенную роль в направленности энерго-пространственно-временного развития сейсмогеодинамических процессов и вносят яркий эффект организации в стохастический поток сейсмических событий.

Выше было показано, что иерархическая СГД-система, как и положено открытым диссипативным системам, обладает высоким уровнем сложности и большим количеством фрактально построенных элементов и подсистем, которые в первом приближении можно представить в виде следующих взаимодействующих элементов, создающих эти подсистемы и систему в целом (рис. 7):

1 – пересекающиеся активные разломы, создающие генерацию (подсистему) подвижных швов и потенциально сейсмоопасных дизъюнктивных узлов;

2 – геоблоки, образованные решеткой разломов, аккумулирующие и импульсивно излучающие упругую энергию, поступающую извне в открытую СГД-систему;

3 – геоны (уединенные волны деформирования), медленно перемещающиеся вдоль разломов и подвижных швов, создающие в дизъюнктивных узлах барьеры (зацепы) и разрушающие их;

4 – очаги землетрясений, возникающие в результате сколов зацепов и испарывания соответствующего участка разлома, временно прекратившего в связи с зацепом тектоническое перемещение на этом участке;

5 – упругие волны, излучаемые очагом и характеризующие его размеры, магнитуду землетрясения и сейсмическую опасность;

6 – волны разгрузки, возникающие после подвижки пород в очаге в результате его деформирования, медленно расходящиеся из очага, влияющие на флуктуации напряженно-деформированного состояния окружающей среды и формирование геонов;

7 – остаточные деформации в очаговой области, возникающие в результате подвижки в очаге и преобразующие дизъюнктивный узел, изменяя ситуацию для будущего зацепа и очередного землетрясения.

Развитие системного подхода к изучению сейсмогеодинамических процессов, несомненно, позволит в дальнейшем обнаружить и другие неизвестные сегодня качества и фундаментальные стороны сейсмических явлений.

Литература

- Гамбурцев Г.А. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений. // «Бюллетень Совета по сейсмологии». 1955. №1.
- Гамбурцев Г.А. Избранные труды. М.: Изд. Академии наук СССР, 1960. 461 стр.
- Ризниченко Ю.В. От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. N 11. С.1-12.
- Ризниченко Ю.В. Расчет сотрясаемости точек земной поверхности от землетрясений в окружающей области // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1966. № 5. С.16-32.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука, 1985. 408 стр.
- Уломов В.И. Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. Ташкент: Изд-во ФАН, 1974. 218 стр.
- Уломов В.И. Решеточная модель очаговой сейсмичности и прогноз сейсмической опасности, Узбекский геолог. журнал, 1987. №6. С. 20 - 25.
- Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений. // Физика Земли, 1993 а, N 4. С. 43-53.
- Уломов В.И. Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений. // «Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии», Выпуск 1. Москва: ИФЗ РАН, 1993 б. С. 24-44.
- Уломов В.И. Моделирование зон возникновения очагов землетрясений на основе решеточной регуляризации. // Физика Земли, 1998, N9. С. 20-38.
- Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии. // Вулканология и сейсмология, № 4 – 5, 1999. С. 6 – 22.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999–2000. 57 стр. Карта на 4-х листах (Главные редакторы В.Н. Страхов и В.И. Уломов). 2000. М.: ОИФЗ–РОСКАРТОГРАФИЯ.
- Уломов В.И., Полякова Т.П., Медведева Н.С. О долгосрочном прогнозе сильных землетрясений в Центральной Азии и в Черноморско-каспийском регионе. // Физика Земли. №4, 2002. С.

ССЫЛАТЬСЯ:

*) Уломов В.И. К 140-летию со дня рождения академика Б.Б.Голицына // Сб. статей "Развитие идей и научного наследия Б.Б.Голицына в сейсмологии. К 140-летию со дня рождения. - М.: ОИФЗ РАН, 2003. С. 3 - 8.

В этой статье фактически было предсказано сильнейшее землетрясение с магнитудой $M=7.5$, произошедшее 27 сентября 2003 года в Горном Алтае (см. Рис. 6в).