

**УЛОМОВ В.И.**

Главный научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, д. ф.-м. н.

# ОБ ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Ключевые слова:** землетрясения, сейсмическая опасность, сейсмическое районирование, инженерная сейсмология, сейсмостойкое строительство.

**Аннотация:** сейсмологические исследования для задач строительной отрасли выполняются в нашей стране уже свыше века. Однако до сих пор все новые методические разработки для районирования сейсмической опасности фактически полностью остаются прерогативой академической науки. Современные нормативные карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97), созданные в 1991–1997 гг. в Институте физики Земли Российской академии наук, заложили основу новой технологии оценки сейсмической опасности. Эта технология и программно-математическое обеспечение могут быть успешно применены в производственных инженерно-сейсмологических изысканиях для строительства. Приведены примеры профессионального подхода к инженерно-сейсмологическим изысканиям в производственной практике. Указано также на недопустимость некорректной «актуализации» действующих карт ОСР-97.

**Key words:** earthquakes, seismic risk, seismic zoning, engineering seismology, anti-earthquake construction.

**Abstract:** seismological studies for the construction industry are performed in our country over the last century. But so far all new methodological development for seismic hazard zoning are the prerogative of academic science. Modern normative maps General Seismic Zoning of the territory of the Russian Federation (GSZ-97), created in 1991–1997 in the Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, laid the foundations of the new technology of seismic risk assessment. This technology and software can be successfully applied in production engineering and seismic prospecting for construction. Examples of professional approach to engineering seismological research in production practices. Also noted that the incorrect «actualization» of existing maps GSZ-97.

Сейсмологические исследования для задач строительной отрасли выполняются в нашей стране уже свыше века. Однако до сих пор они практически целиком остаются прерогативой академической науки, хотя и существуют отдельные методические пособия, поясняющие применение тех или иных научных разработок в инженерно-геологических изысканиях.

Оценка сейсмической опасности обычно сводится к вычислению максимально возможных сейсмических воздействий, которые необходимо учитывать при строительстве в сейсмических районах. Сейсмическая опасность отражается на картах сейсмического районирования той или иной территории. В нашей стране в зависимости от задач и необходимой детальности картирования сейсмической опасности рассматриваются три типа (ранга) сейсмического районирования: (1) общее сейсмическое районирование (ОСР) — для всей территории страны; (2) детальное сейсмическое районирование (ДСР) — для ограниченных площадей и отдельных регионов; (3) сейсмическое микрорайонирование (СМР) — для городов, населенных пунктов и строительных площадок.

Составление карт общего сейсмического районирования всей террито-

рии страны (ОСР) уже свыше 70 лет выполняется фактически в одном и том же академическом институте, который время от времени лишь менял свое наименование (Сейсмологический институт — СИАН, Геофизический институт — ГЕОФИАН, Институт физики Земли — ИФЗ АН СССР, Объединенный институт физики Земли — ОИФЗ РАН, ныне — ИФЗ РАН). И хотя к исследованиям по ОСР обычно привлекались отдельные сотрудники из других академических и отраслевых организаций, права нормирования сейсмической опасности до сих пор остаются за ИФЗ.

Начиная с первой карты ОСР образца 1937 года (отв. ред. Г.П. Горшков, СИАН), все последующие версии карт (1949, 1957, 1968, 1978 и 1997 годов) прилагались к соответствующим нормативным документам и предназначались для планирования рационального землепользования и обеспечения надежности строительства в сейсмоактивных районах страны. Прогнозируемый сейсмический эффект на всех картах ОСР отнесен к средним грунтовым условиям (грунтам второй категории по СНиП II-7-81\* «Строительство в сейсмических районах»). Карты ОСР публиковались в масштабах 1:5 000 000 и 1:8 000 000, а исходными масштабами являлись 1:2 500 000 и 1:1 000 000. Детализация карт ОСР и учет влияния на

сейсмический эффект всего многообразия местных тектонических, геодинамических и инженерно-геологических факторов должны осуществляться путем исследований по ДСР (в масштабе 1:500 000 и крупнее) и СМР (в масштабе 1:50 000 и крупнее).

Наиболее продвинутым в прикладных инженерно-геологических изысканиях оказалось сейсмическое микрорайонирование, определяющее влияние местных грунтов на ожидаемый сейсмический эффект, то есть его усиление или ослабление. Право на выполнение СМР еще с советских времен предоставлено не только академическим, но и производственным организациям благодаря достаточно формализованным методам этих исследований. Однако и в этой отрасли инженерных изысканий остаются определенные недоработки.

Хуже всего дело обстоит с детальным сейсмическим районированием (ДСР), призванным в более крупном масштабе по сравнению с ОСР исследовать геолого-геофизическое строение и геодинамику конкретных регионов и площадей, выявлять и изучать сейсмогенерирующие структуры (СГС) зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ), уточнять параметры сильных движений грунта и картировать сейсмическую опасность. Как ни пара-

доксально, но у ДСР до сих пор, с советских времен, отсутствует даже официальный статус. Не существует и полноценных сводов правил (СП), не определен порядок утверждения и т.п.

Все карты общего сейсмического районирования (ОСР), за исключением действующего ныне комплекта вероятностных карт ОСР-97, были детерминистскими и практически не учитывали особенностей сейсмического режима сейсмоактивных регионов, не оценивали степень возможного сейсмического риска.

Нормативные карты ОСР-97, созданные в ИФЗ РАН в 1991–1997 годах, заложили основу новой технологии оценки сейсмической опасности, которая достаточно формализована и может быть успешно применена в производственных инженерно-сейсмологических изысканиях в практике сейсмостойкого строительства. Этому постоянно содействует коллектив авторов ОСР-97 не только с помощью своих публикаций, но и путем непосредственного обучения пользователей работе с базой данных и программно-математическим обеспечением ОСР-97. Наиболее успешными и практически самостоятельными в этом отношении стали «неакадемические» коллективы Экологического центра рационального освоения природных ресурсов (НП

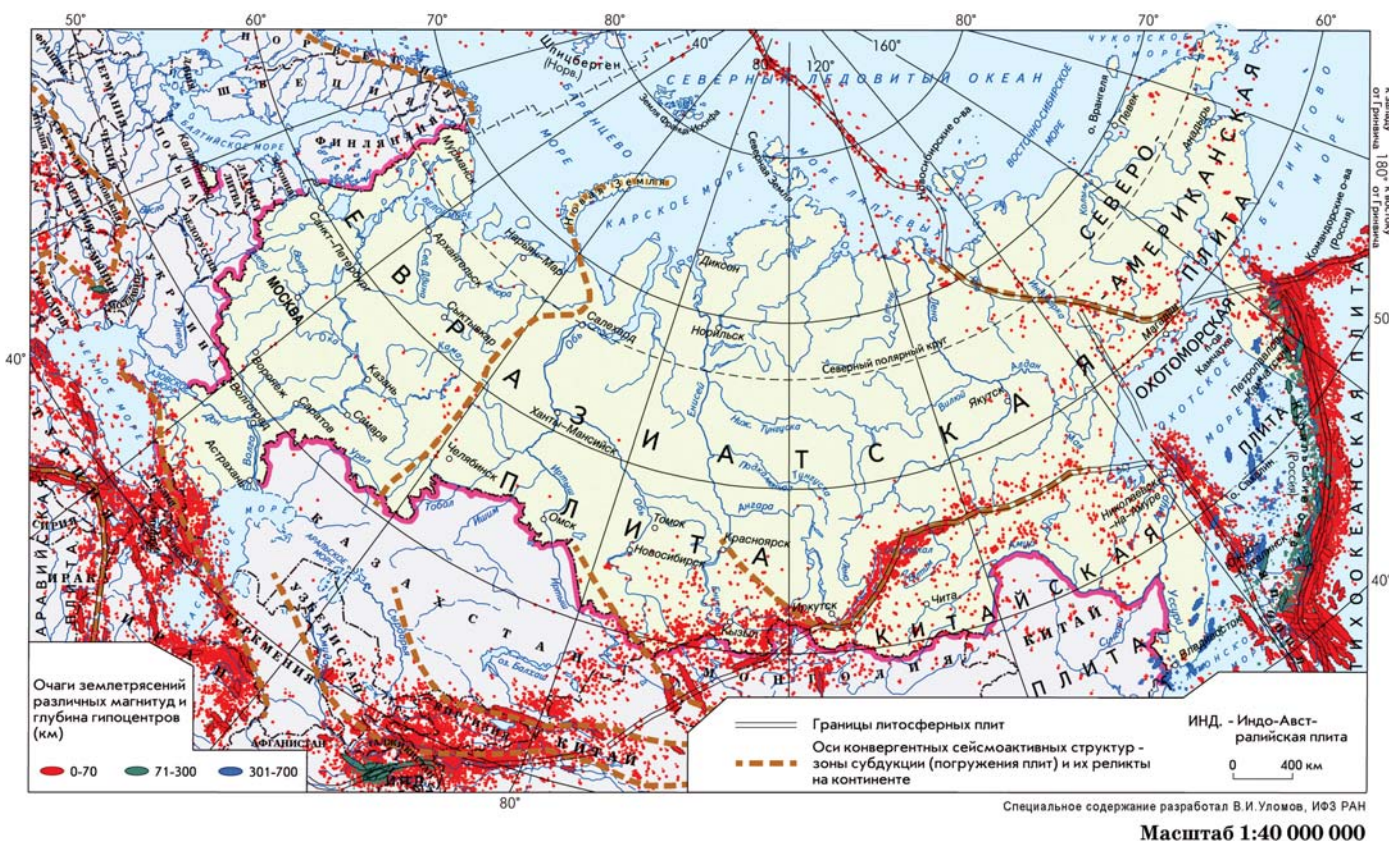


Рис. 1. Сейсмичность России и сопредельной территории

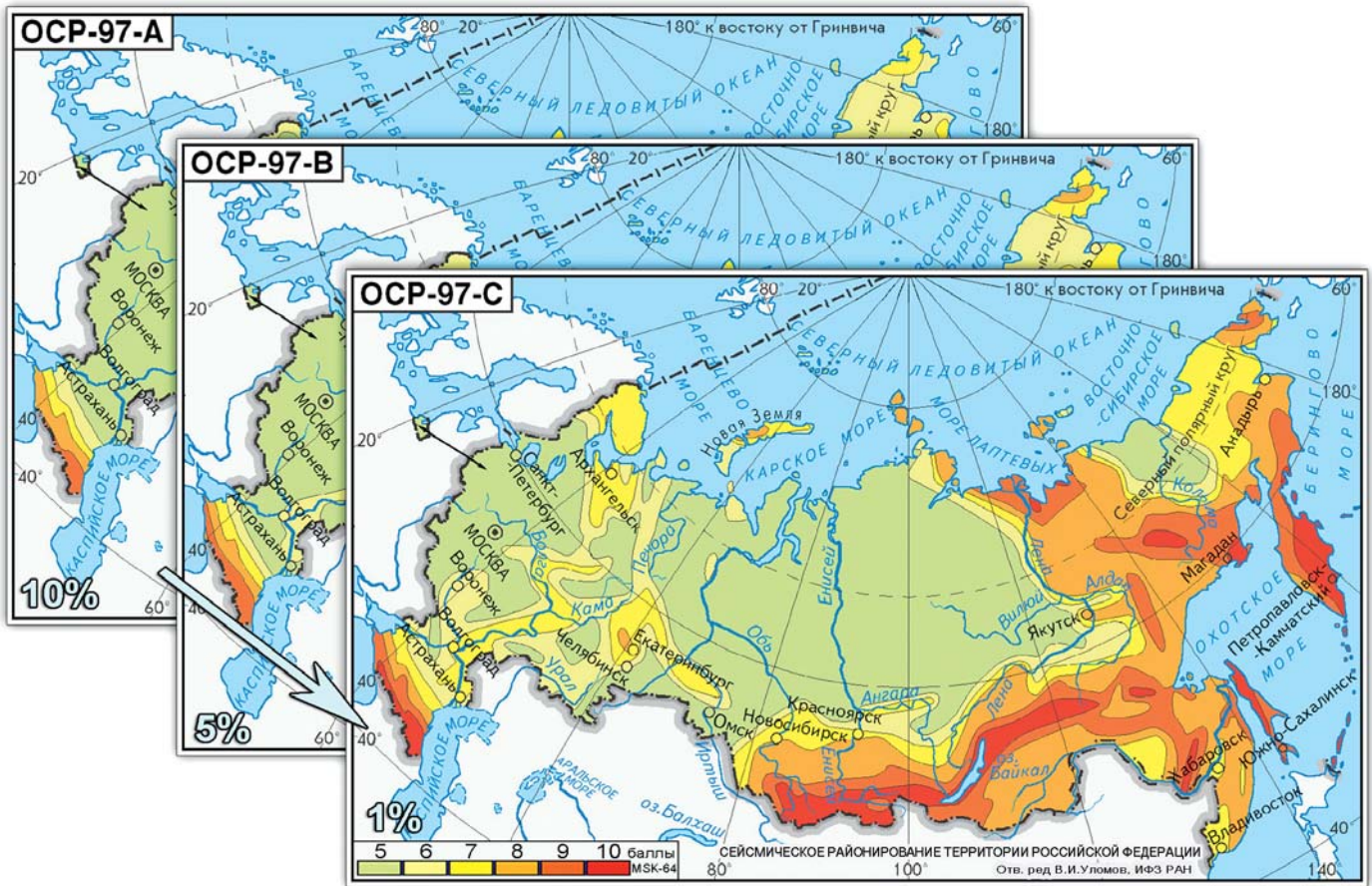


Рис. 2. Комплект вероятностных нормативных карт ОСР-97 (А, В, С)

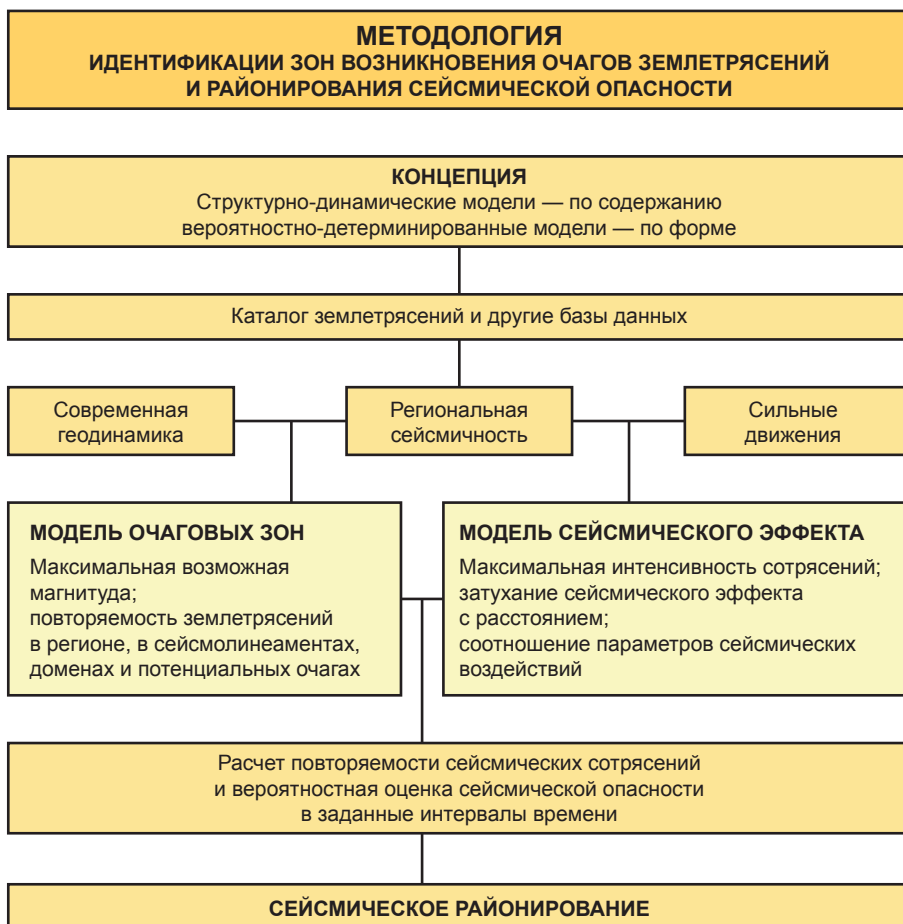


Рис. 3. Блок-схема методологии ОСР-97

«ЭЦ РОПР», г. Красноярск) и ВНИИАЭС «Проектный офис» (г. Москва) государственной корпорации «Росатом».

В заключительной части этой статьи приводятся примеры профессиональных и непрофессиональных исследований по детализации карт ОСР-97, выполненных разными исполнителями в одном и том же регионе на юге Красноярского края.

**Сейсмичность территории России**

В сейсмическом отношении территория России принадлежит Северной Евразии, сейсмичность которой обусловлена интенсивным геодинамическим взаимодействием нескольких крупных литосферных плит: Евразийской, Африканской, Аравийской, Индо-Австралийской, Китайской, Тихоокеанской, Северо-Американской и Охотоморской (рис. 1). Наиболее подвижными и сейсмоактивными являются границы плит, где формируются крупные сейсмогенерирующие орогенетические пояса: Альпийско-Гималайский — на юго-западе; Транс-азиатский — на юге; пояс Черского — на северо-востоке; Тихоокеанский — на востоке Северной Евразии. Каждый из поясов состоит из регионов, несколько различающихся между собой

по глубинному строению, прочностным свойствам и сейсмогеодинамике.

Характерной особенностью всех сейсмоактивных регионов является их примерно одинаковая протяженность (около 3000 км), обусловленная размерами зон субдукции литосферы, погружающейся в мантию Земли по периферии океанов, и орогенических реликтов таких зон на континентах. Каждому региону свойственны определенная периодичность возникновения землетрясений разных магнитуд и миграция сейсмической активизации вдоль зон разломных структур. Величина магнитуды землетрясений ( $M$ ) зависит от прочностных свойств геофизической среды и размеров (протяженности) сейсмических очагов. Так, длина разрыва пород в очагах землетрясений с  $M = 7,0$  и выше достигает десятков и сотен километров. Здесь и далее магнитуда  $M$  соответствует магнитуде  $M_LH$ , определяемой по поверхностным волнам землетрясений.

Преобладающее число сейсмических очагов сосредоточено в верхней

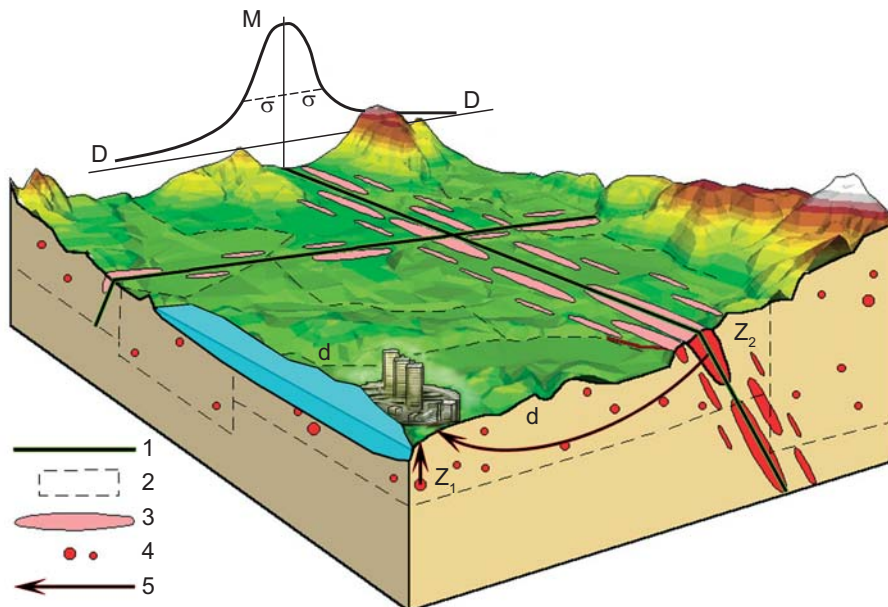


Рис. 4. ЛДФ-модель зон ВЗ

части земной коры на глубинах до 15–20 км. Самые глубокие очаги (до 650 км) характерны для Курило-Камчатской зо-

ны субдукции. Землетрясения с промежуточной глубиной очагов (70–300 км) происходят в Восточных Карпатах

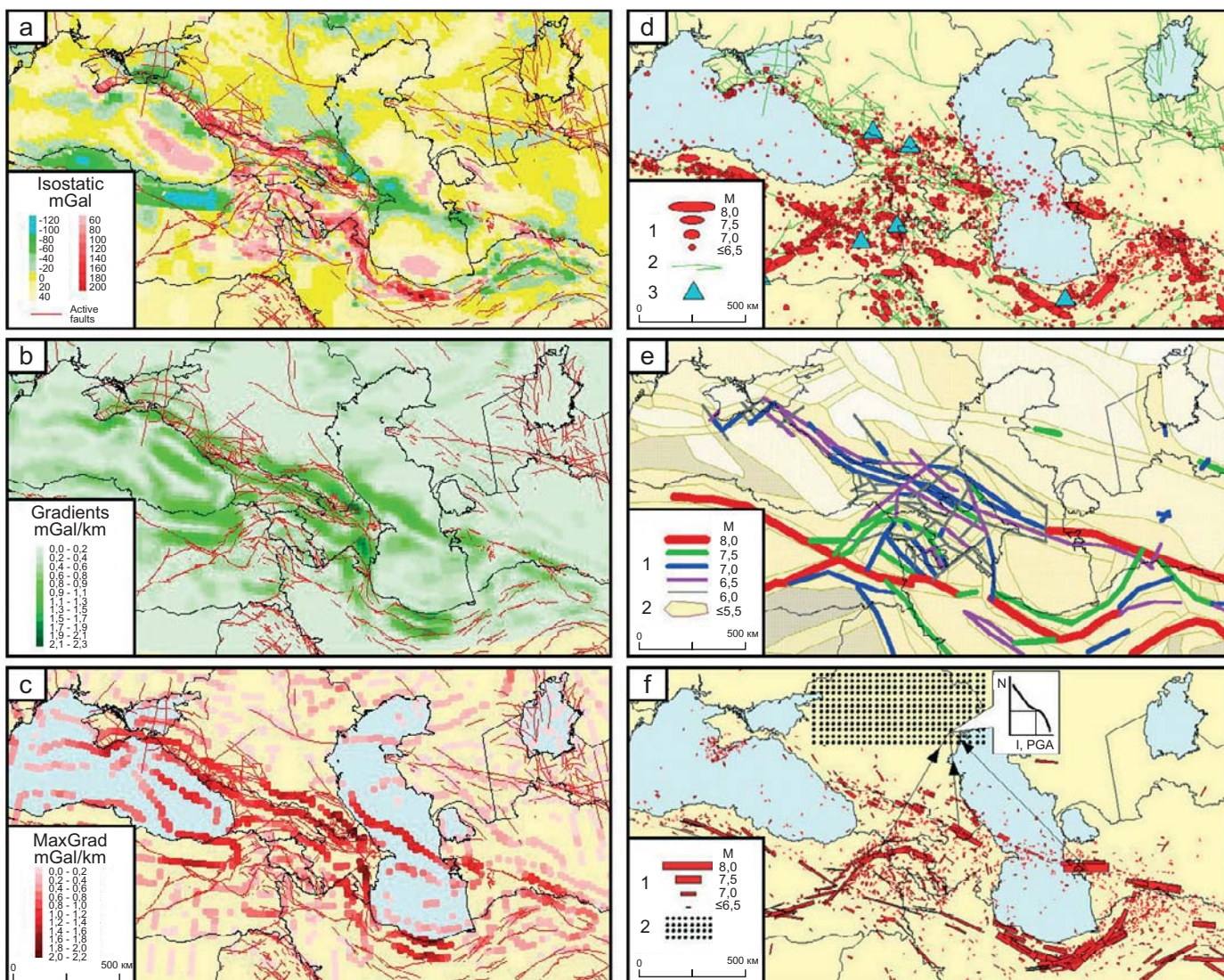


Рис. 5. Создание ЛДФ-модели зон ВЗ Иран-Кавказ-Анатолийского региона

(Румыния, зона Вранча), в Центральной Азии (Афганистан, зона Гиндукуша), а также встречаются под Большим Кавказом и в центральной части Каспийского моря. Наиболее сильные из них ощущаются на территории России.

**Сейсмическая опасность**

Территория Российской Федерации по сравнению с другими странами мира, расположенными в сейсмоактивных регионах, в целом характеризуется умеренной сейсмической опасностью. Исключение составляют Северный Кавказ, юг Сибири и Дальний Восток, где интенсивность сейсмических сотрясений достигает 9–10 баллов и более по макросейсмической шкале MSK-64. Определенную угрозу представляют также 6–7-балльные зоны в густонаселенной европейской части страны.

С целью прогноза сейсмической опасности и обеспечения сейсмостойкого строительства необходимыми инженерными данными, как уже отмечалось выше, в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН в 1991–1997 годах на основе новой методологии под руководством и при участии автора этих строк был создан новый комплект карт общего сейсмического районирования Российской Федерации — ОСР-97 (рис. 2). Впервые сейсмическим районированием была охвачена вся обширная территория Северной Евразии, включая платфор-

менные регионы и шельфы окраинных и внутренних морей. Впервые в расчетах сейсмической опасности учитывались размеры сейсмических очагов и их положение в пространстве. Впервые был создан комплект вероятностных карт ОСР, а не одна детерминистская карта, как прежде. Этот комплект состоит из трех карт — ОСР-97-А, ОСР-97-В и ОСР-97-С, отражающих соответственно 10-, 5- и 1%-ные вероятности возможного превышения (или 90, 95 и 99% отсутствия превышения) расчетной сейсмической интенсивности в течение 50-летних интервалов времени, что соответствует повторяемости сейсмического эффекта на земной поверхности в среднем один раз в 500, 1000 и 5000 лет.

Для территории России комплект карт ОСР-97 принят в качестве нормативного документа и в 2000 году вошел составной частью в СНиП II-7-81\* «Строительство в сейсмических районах». Дифференцированные оценки сейсмической опасности позволяют использовать комплект ОСР-97 для оценок сейсмического риска, который в реальности всегда существует, и принимать за основу ту или иную карту в соответствии с категорией ответственности (социально-экономической значимости) и сроками службы каждого проектируемого строительного объекта.

Для чрезвычайно ответственных сооружений, таких как атомные станции и другие объекты ядерно-радиацион-

ного комплекса, создана карта ОСР-97D, учитывающая даже такие редкие сейсмические события, которые возникают на исследуемой площади в среднем один раз в 10 000 лет.

Карта ОСР-97-А, представленная нами в пиковых ускорениях колебаний грунта, вошла в качестве составной части в первую мировую карту глобальной сейсмической опасности (Global Seismic Hazard Map, или GSHMAP), опубликованную в 1999 году в США под эгидой ООН.

Новая методология вероятностного сейсмического районирования и комплект карт ОСР-97 были удостоены диплома первой степени Международной выставки-ярмарки «Инновации-98», медали Всероссийского выставочного центра (ВВЦ) и Государственной премии Российской Федерации 2002 года в области науки и техники.

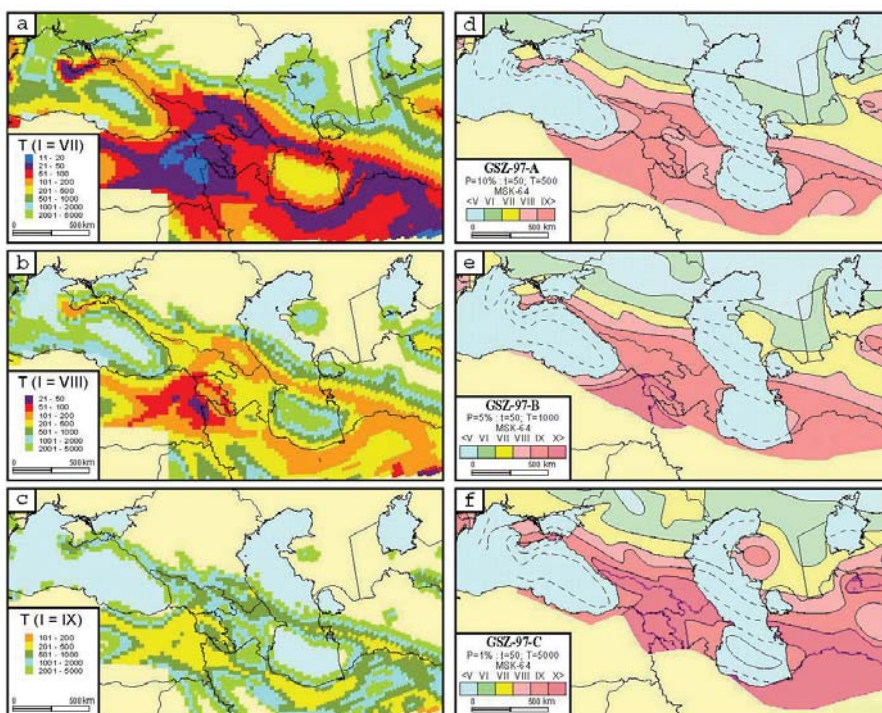
**Источники землетрясений и их моделирование**

Выявление сейсмогенерирующих структур (СГС) в зонах возникновения очагов землетрясений (зонах ВОЗ) и определение параметров их сейсмического режима являются самым сложным и наиболее ответственным звеном в исследованиях по сейсмическому районированию, поскольку от этого зависит надежность всех последующих построений.

Методология ОСР-97 базируется на создании двух взаимосвязанных сейсмогеодинамических моделей — модели очаговых зон (МОЗ) и модели сейсмического эффекта (МСЭ). Каждая из них отражает структурно-динамическое единство природной среды и вероятностный характер развивающихся в ней сейсмических процессов.

Как показано на рис. 3, на основе трех блоков базы исходных данных (современной геодинамики, региональной сейсмичности и сильных движений грунта) попарно формируются две модели — МОЗ и МСЭ, с помощью которых путем компьютерного моделирования осуществляется расчет повторяемости сейсмических сотрясений на земной поверхности и составляются карты сейсмического районирования.

В основу модели зон ВОЗ Северной Евразии положена линейно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель (рис. 4), которая определенным образом параметризуется и в дальнейшем участвует в компьютерном моделировании реальной сейсмичности.



**Рис. 6. Карты периодов повторяемости сотрясений и сейсмического районирования Иран-Кавказ-Анатолийского региона**

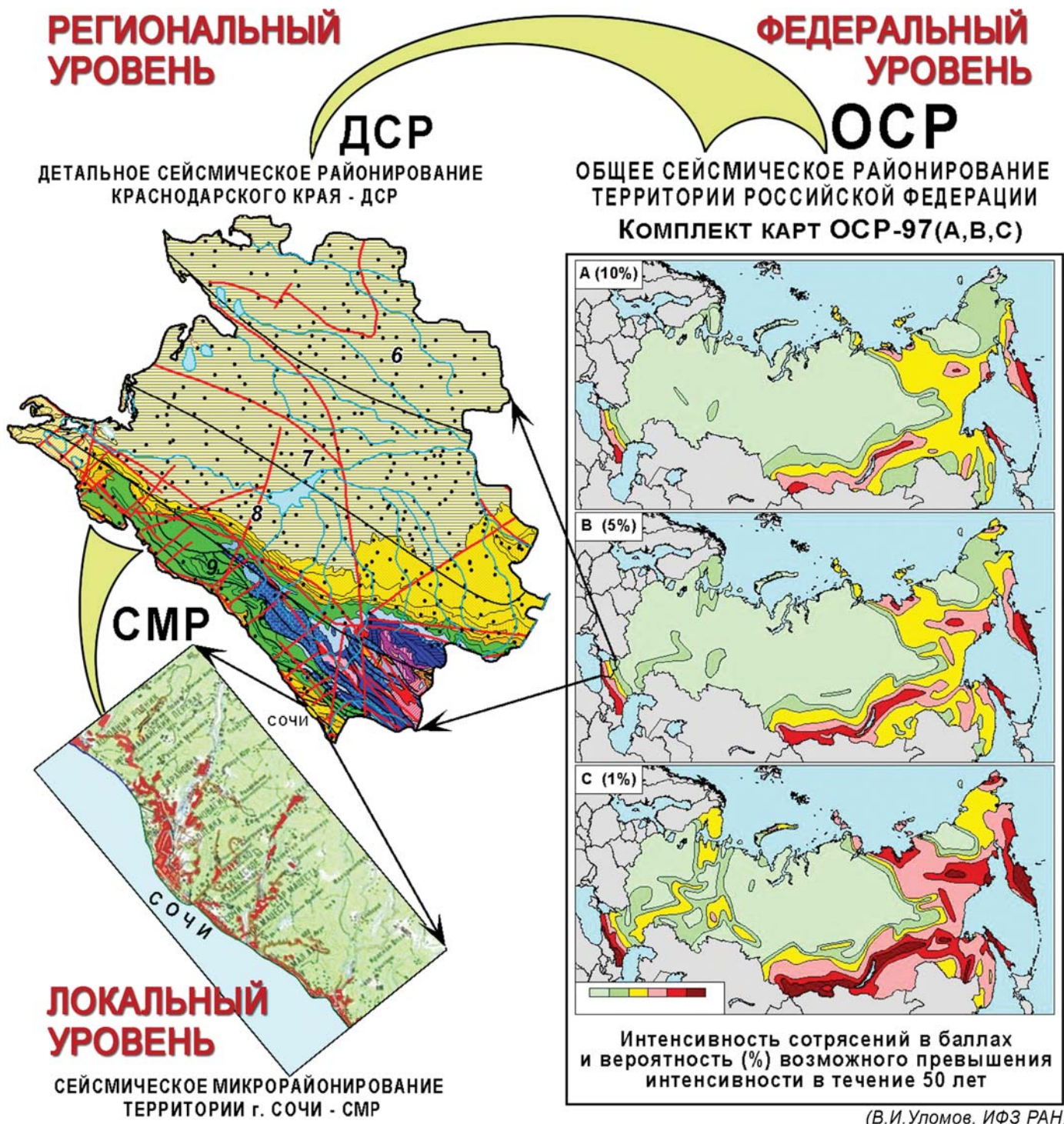


Рис. 7. Последовательность сейсмического районирования разных типов и масштабов

В соответствии с принятой в ОСР-97 концепцией в ЛДФ-модели рассматриваются четыре масштабных уровня источников землетрясений — крупный регион с интегральной характеристикой регионального сейсмического режима и три его основных структурных сейсмогенерирующих элемента:

- линеаменты (см. 1 на рис. 4), в генерализованном виде представляющие собой оси трехмерных сейсмоактивных разломных или сдвиговых структур, отражающие структурированную сейсмичность и являющиеся основным каркасом ЛДФ-модели;

- домены (см. 2 на рис. 4), охватывающие квазиоднородные в геодинамическом отношении объемы геологической среды и характеризующиеся рассеянной сейсмичностью;
- потенциальные очаги землетрясений (см. 3 на рис. 4), указывающие на наиболее опасные участки (фокусы) сейсмогенерирующих структур (каждый из виртуальных очагов, генерируемых компьютером в процессе моделирования, участвует в расчетах сейсмического эффекта, создаваемого на земной поверхности, см. 5 на рис. 4).

Линеаменты, домены и потенциальные очаги, как и сами землетрясения, классифицируются по величине максимальной магнитуды ( $M_{max}$ ) с шагом 0,5 и в интервале  $\pm 0,2$  единицы  $M$ . Минимальное значение магнитуды землетрясений вдоль линеаментов в ОСР-97 принято равным 6,0 (точнее,  $M = 5,8 \pm 0,2$ ), поскольку при генерализованном районировании, каковым является ОСР, очаги с меньшей магнитудой выделяются недостаточно надежно. В случае же детального сейсмического районирования (ДСР), как это будет показано далее, нижний порог



Рис. 8. Блок-схема технологии детализации и актуализации карт ОСР-97

магнитуд для линеаментов может быть понижен.

Поскольку реальные очаги не располагаются строго вдоль осей линеаментов, а отклоняются определенным образом в обе стороны от них, при моделировании виртуальной сейсмичности используются функции статистического распределения, аналогичные изображенной на заднем плане на рис. 4. 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 геологическую среду и ее фрактальным строением.

Очаги землетрясений с  $M = 5,5$  (точнее,  $M = 5,7$  и менее) принадлежат доменам. Их верхний порог также может быть понижен при детализации карт ОСР-97, а сами очаги, рассеянные в доменах, сгруппируются в соответствующие кластеры линеаментов меньших рангов. Этот подход будет проиллюстрирован в конце статьи.

На рис. 5 на примере Иран-Кавказ-Анатолийского региона показана технология построения ЛДФ-модели зон ВОЗ, а на рис. 6 приведены результаты компьютерного моделирования карт периодов повторяемости сейсмического эффекта на земной поверхности и сейсмического районирования этого региона.

На основе данных об активных разломах, гравитационных изостатических аномалиях, их градиентах, максимумах этих градиентов (рис. 5 а–с), региональной сейсмичности (рис. 5 d) и других геолого-геофизических дан-

ных создается ЛДФ-модель зон ВОЗ (рис. 5 e), представленная в виде трех основных структурных элементов: линеаментов, доменов и потенциальных очагов (фокусов) землетрясений различных магнитуд.

Затем на основе сейсмологической и сейсмогеодинамической параметризации каждого из структурных элементов ЛДФ-модели на заданном интервале времени разыгрываются синтетические (виртуальные) очаги землетрясений, изображенные в виде прямоугольников на рис. 5 f, размеры и ориентация которых соответствуют сейсмическому потенциалу (магнитуде) и ориентации в пространстве плоскостей соответствующих линеаментов. Очаги землетрясений с  $M = 6,0 \pm 0,2$  и более, принадлежащие линеаментам, разыгрываются в соответствии с заданной функцией их распределения относительно осей соответствующих линеаментов (см. график на рис. 4). Сейсмические очаги с  $M = 5,5 \pm 0,2$  и менее, принадлежащие доменным структурам, рассеиваются случайным образом в пределах каждого из доменов в соответствии с их сейсмическим режимом и толщиной сейсмоактивного слоя.

Далее вся исследуемая территория покрывается (виртуально, с помощью компьютера) равномерной сеткой, фрагмент которой показан на рис. 5 f. В ОСР-97 шаг сетки был принят равным 25 км. В случае детализации построений (как будет показано ниже) он может быть уменьшен. ЛДФ-модель активизируется компьютером, и в его памяти формируется карта виртуальных очагов землетрясений на достаточно

длительный интервал времени (сотни тысяч лет). Одновременно каждый узел решетки (приемник) опрашивает все возникающие виртуальные очаги и накапливает информацию о повторяемости сейсмических сотрясений разной интенсивности (график сотрясаемости см. на рис. 5 f), выраженной в баллах (как на картах ОСР-97) или в ускорениях сейсмических колебаний (как на международной карте GSHMAP). При этом учитываются размеры очагов землетрясений и сейсмическое излучение всей их поверхностью.

Следующие шаги достаточно просты (рис. 6). При заданной фиксированной величине сейсмической интенсивности рассчитываются карты периодов  $T$  (в количестве лет) повторяемости сейсмического эффекта (в данном случае 7, 8 и 9 баллов, см. рис. 6 а–с). Такие карты могут быть использованы для вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) при выборе любых периодов повторяемости сейсмического эффекта, а также для получения дробных оценок сейсмического эффекта.

Наконец, задаваясь фиксированными периодами повторяемости сейсмического эффекта (в ОСР-97 это 500, 1000 и 5000 лет), рассчитываются и строятся карты сейсмического районирования с 10-, 5- и 1%-ными вероятностями возможного превышения указанных на них номиналов в течение 50-летних интервалов времени (см. рис. 6 с–f).

Необходимо также подчеркнуть, что при одной и той же модели зон ВОЗ, характеризующейся конкретными параметрами сейсмического режима, изменение длительности периодов повторяемости сейсмического эффекта приводит к изменению не только номиналов, но и конфигурации границ между зонами. Природа такого явления объясняется последовательным проявлением сейсмогенерирующих структур, характеризующихся даже очень редкой повторяемостью сейсмических событий. Это обстоятельство (как и некоторые другие упущения и промахи), к сожалению, не было учтено в прошлых картах ОСР, что привело к целому ряду социально-экономических потерь и к человеческим жертвам на территории бывшего СССР вследствие занижения оценок сейсмической опасности на 2–3 балла (в Армении в 1988 году, в Казахстане в 1990 году, в Грузии в 1991 году, в России (Корякии) в 1991 году, в Киргизии в 1992 году, в России (на о. Сахалин) в 1995 году).

## О детализации ОСР-97

Как уже сообщалось, прежние карты ОСР составлялись и обновлялись каждые 10 лет. Однако фрагментарно они изменялись гораздо чаще, фактически после каждого крупного землетрясения, сейсмический эффект которого существенно превышал номиналы, указанные на этих картах. И хотя с картами ОСР-97 такого пока не произошло, актуализация их исходной базы данных (каталогов землетрясений, макросеймики и др.), а также самих карт необходима. Лаборатория континентальной сейсмичности и прогноза сейсмической опасности ИФЗ совместно с Геофизической службой РАН (г. Обнинск) систематически продолжает пополнять использованный при создании карт ОСР-97 Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии (SECNE, отв. ред. Н.В. Кондорская и В.И. Уломов), составленный на период с древнейших времен по 1995 год. За прошедшее с момента создания карт ОСР-97 время на территории Северной Евразии уже произошли тысячи сейсмических событий с магнитудой  $M = 3,5$  и выше, сведения о которых можно использовать при детализации и актуализации карт ОСР-97.

Уточнение модели зон ВОЗ в более крупном масштабе (1:500 000 и крупнее) по сравнению с ОСР-97 должно осуществляться путем выполнения исследований по детальному сейсмическому районированию (ДСР). Основой же всех последующих работ должны быть карты ОСР-97, технология их создания и уточняемая в процессе ДСР модель зон ВОЗ. Не менее важно, чтобы карты ДСР и СМР были вероятностными и в обязательном порядке включали в себя нормативные интервалы времени, принятые в ОСР-97 (то есть 500, 1000 и 5000 лет).

На рис. 7 на примере Краснодарского края и г. Сочи показана последовательность уточнения сейсмической опасности путем перехода от ОСР-97 страны к ДСР края и СМР территории города.

На рис. 8 приведена блок-схема детализации карт ОСР-97.

Одним из новшеств в актуализации карт ОСР-97 может стать региональное сейсмическое зонирование (РСЗ) в полубалльном представлении ожидаемого сейсмического эффекта, что вполне аргументированно, по крайней мере, по двум обстоятельствам. Так, при макросейсмических обследованиях последствий сильных землетрясений общепринято оценивать сейсмический эффект не только в целочисленных баллах, но и в промежуточных значениях сей-

мического эффекта (например, 5–6, 6–7, 7–8 баллов и т.д.). В пользу такого представления свидетельствует и градация шкалы пиковых ускорений, принятая на международной карте глобальной сейсмической опасности (GSHMAP) с шагом, близким к значению в 0,5 балла.

Очевидно, что, пользуясь в расчетах сейсмических воздействий самыми разными значениями пиковых ускорений (как общепринято), можно оперировать и долями баллов, осуществляя соответствующий пересчет одних ве-

личин в другие по их корреляционным зависимостям.

Перевод сейсмической интенсивности ( $I$ , баллы) в пиковые ускорения ( $A$ , см/с<sup>2</sup>) и наоборот можно выполнять по формулам (1) и (2), регламентирующим нижний (1) и верхний (2) пределы величин ускорений.

$$A_{\text{MSK-64}} = 10^{0,301 \times I - 0,107}, \quad (1)$$

$$A_{\text{SHA-97}} = 10^{0,333 \times I - 0,222}. \quad (2)$$

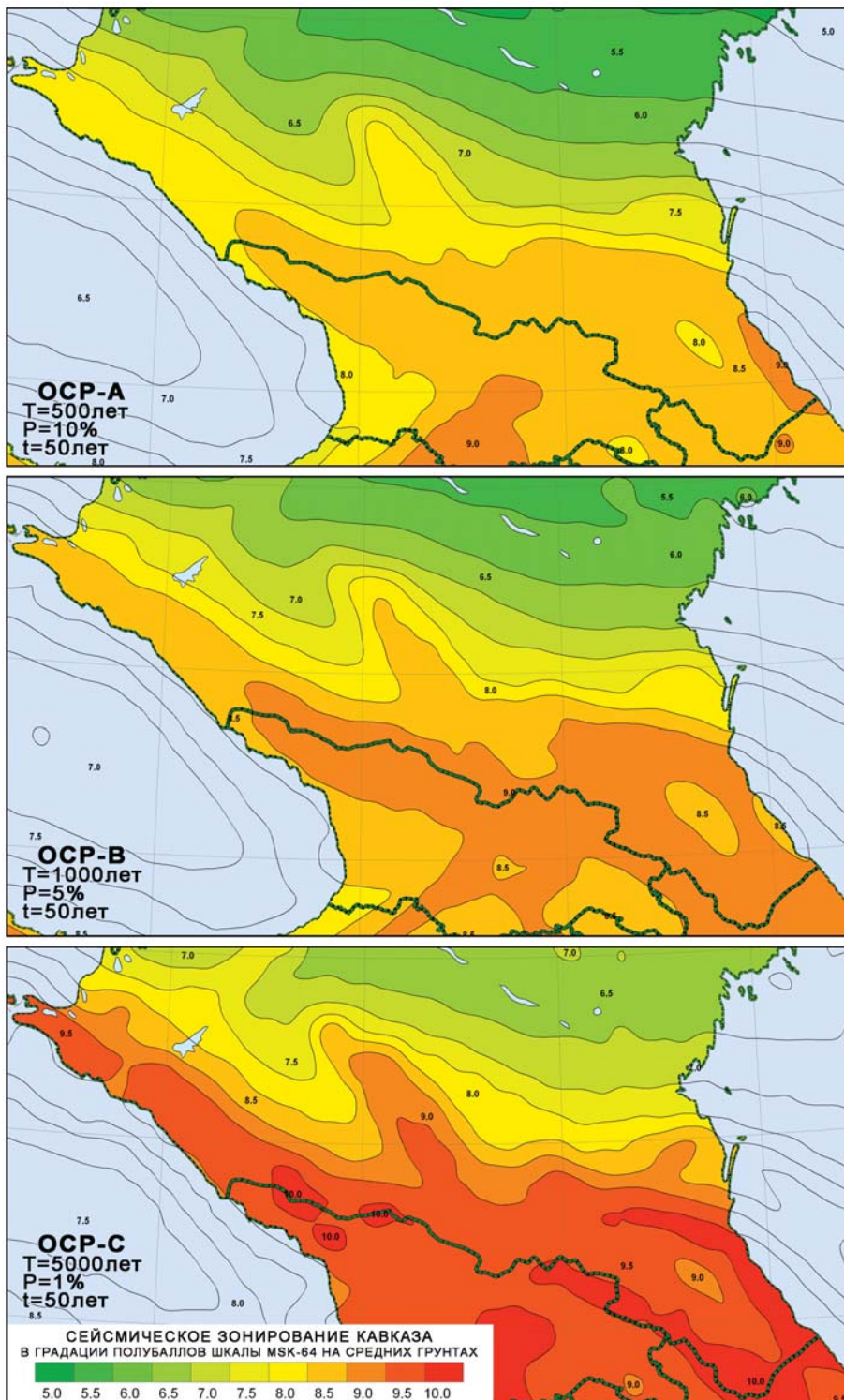


Рис. 9. Региональное сейсмическое зонирование (РСЗ) Кавказа в градации через 0,5 балла



Таблица 1

Перевод сейсмической интенсивности в пиковые ускорения		
I баллы MSK-64	A см/с/с msk-64	A см/с/с sha-97
4	13	13
4,5	18	19
5	25	28
5,5	35	41
6	50	60
6,5	71	88
7	100	129
7,5	141	189
8	200	277
8,5	283	406
9	400	596
9,5	566	874
10	800	1282



**Рис. 10. Гидротехнические сооружения в Енисей-Ангарском бассейне и район железнодорожной ветки (малый эллипс), исследуемый с целью уточнения его сейсмической опасности**



**Рис. 11. Фрагмент карты эпицентров землетрясений, зарегистрированных за период 2002–2009 гг. Показана трасса железной дороги Курагино — Кызыл и оконтурено местоположение Саяно-Шушенской ГЭС**

Зависимость (1) предписана СНиП П-7-81\* в соответствии со шкалой MSK-64 и принимается в качестве нижнего предела, а зависимость (2) была предложена автором этих строк для территории Северной Евразии при участии в создании первой мировой карты глобальной сейсмической опасности (GSHMAP) в 1992–1999 годах. Как показывает практика, значения ускорений, определенные в реальных грунтовых условиях, обычно оказываются внутри интервалов значений, соответствующих (1) и (2). Нередко расчеты выполняются даже с точностью до десятых долей балла, что целесообразно делать при сейсмическом микрорайонировании, когда для конкретных грунтов вычисляются такие же дробные величины приращения балльности. Сложение же (или вычитание) целочисленных поправок СМР и баллов карт ОСР-97 может приводить к существенному завышению (или занижению) величин ожидаемых сейсмических воздействий.

На рис. 9 в качестве примера градации в 0,5 балла приведены фрагменты карт ОСР-97 для Кавказа. Расчет этих карт, называемых нами картами регионального сейсмического зонирования (РСЗ), был осуществлен на основе той же самой ЛДФ-модели зон ВОЗ, что и ОСР-97, без каких-либо ее изменений и уточнений. Новизна же карт РСЗ состоит лишь в том, что сейсмические зоны здесь детализированы по той же технологии, что и для ОСР-97.

Перевод сейсмической интенсивности, представленной в градации 0,5 балла, в пиковые ускорения может осуществляться по тем же зависимостям (1) и (2). При этом полубалльные зоны приобретут медианные значения смежных с ними зон с целочисленными значениями интенсивности (табл. 1).

Здесь уместно еще раз подчеркнуть, что слишком большой шаг целочисленной градации приводит не только к «совпадению балльности» для одних и тех же пунктов на разных картах ОСР-97, но и к искажениям оценок сейсмической опасности. Если же представлять макросейсмический эффект в виде непрерывной поверхности, как это и происходит при расчетах в технологии ОСР-97, или даже проводить вычисления с точностью до десятых долей балла, то никаких «совпадений балльности» вообще не будет наблюдаться. Таким образом, одна и та же величина макросейсмической интенсивности, выраженная в целочисленных

баллах на разных картах ОСР-97, имеет разный вес, который растет от карты А к картам В и С. Это обстоятельство в виде коэффициентов, предложенных Я.М. Айзенбергом, уже учитывается в ряде нормативных документов по сейсмостойкому строительству.

Карты РСЗ в градации 0,5 балла в случае их официального признания существенно сократят число «совпадений балльности» на картах ОСР-97, поскольку площади перекрытия зон при РСЗ значительно уменьшатся по сравнению с зонами в целочисленной градации макросейсмической интенсивности. Соответственно более реалистичными станут и расчетные величины ожидаемых сейсмических нагрузок на здания и сооружения, уточняемые в настоящее время специальными коэффициентами в зависимости от сочетания величин сейсмической интенсивности (балльности) на картах ОСР-97.

**Достижения и недостатки**

Сейсмический риск уменьшается при использовании каждой последующей карты (от А к С и D), поскольку с увеличением расчетного периода ожидания сейсмического эффекта повышаются и номиналы карт. Следовательно, возрастает не только надежность, но и стоимость строительства. Нередко, чтобы снизить затраты, инвесторы предлагают «переоценщикам» сейсмической опасности снизить балльность на картах ОСР-97 в интересующем их районе.

Ниже приводится пример исследований по детализации карт ОСР-97, профессионально выполненных красноярскими специалистами, а также сообщается о недозволенных приемах других исследователей по искусственному занижению оценок сейсмической опасности.

17 августа 2009 года на самой мощной в России Саяно-Шушенской ГЭС (СШ ГЭС) на юге Красноярского края произошла катастрофа — внезапное разрушение и затопление машинного зала, в результате чего погибло множество людей и была остановлена работа электростанции. На ликвидацию аварии потребуются миллиардные денежные вложения и несколько лет восстановительных работ. Одной из возможных причин аварии, по заявлению главы Ростехнадзора Н.Г. Кутьина, могла явиться «аномальная сейсмическая вибрация», которая была зарегистрирована за несколько минут до катастрофы. Данные о вибрации были

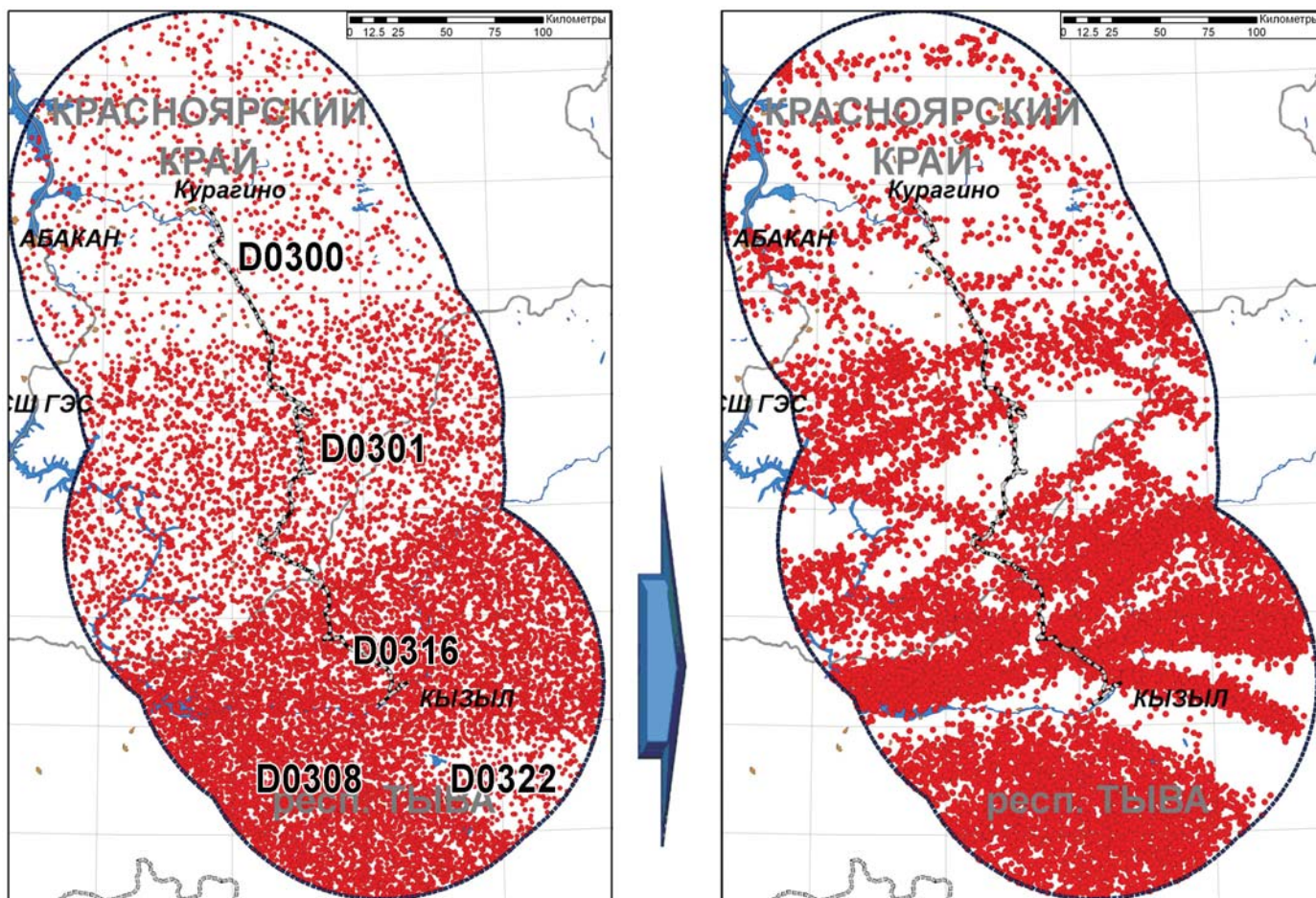


Рис. 12. Эпицентры землетрясений с  $M_{\max} \leq 5,5 \pm 0,2$  в доменах с рассеянной (слева) и с структурированной сейсмичностью (справа) вдоль железной дороги Курагино — Кызыл

получены с одной из сейсмостанций, расположенных в непосредственной близости от СШ ГЭС. Раньше вокруг этой ГЭС работало четыре сейсмостанции, но три из них были закрыты, по-

этому местоположение источника вибрации определить не удалось.

В связи с этим необходимо обратить внимание на недопустимое искусственное занижение оценок сейсмической

опасности, предпринятое в этом же году еще до катастрофы на СШ ГЭС для района строящейся Богучанской ГЭС, расположенной в нижнем течении р. Ангары в пределах того же Алтае-

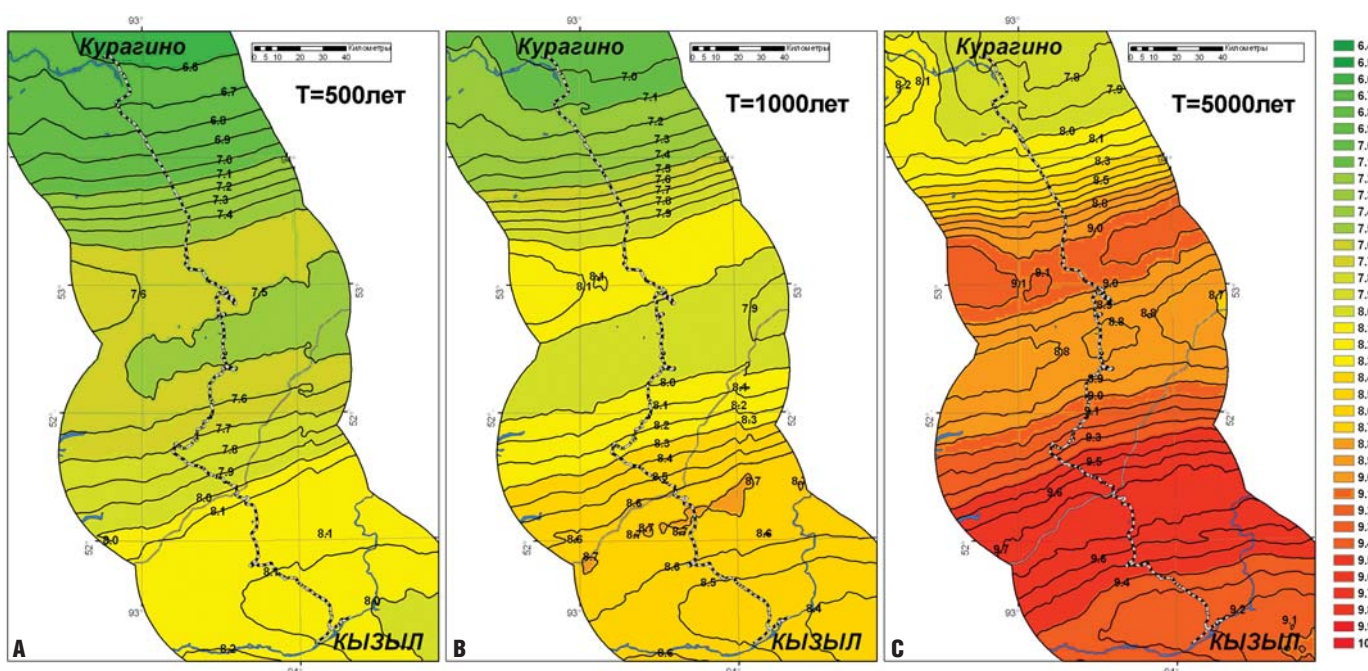
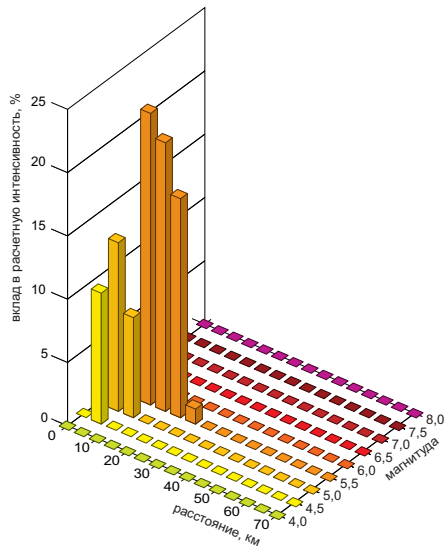


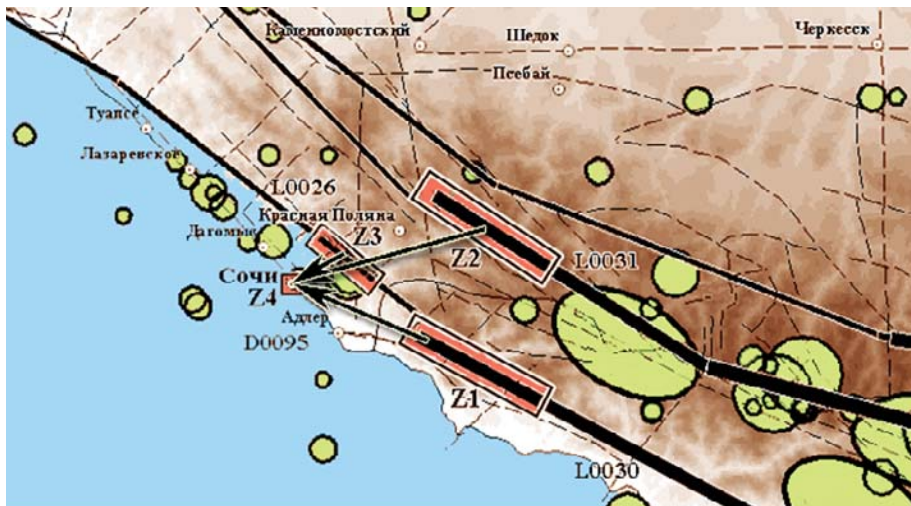
Рис. 13. Результаты расчетов интенсивности сотрясений для полосы шириной 50 км от проектируемой железнодорожной трассы и для периодов повторяемости 500, 1000 и 5000 лет (карты А, В, С)



**Рис. 14. Результаты деагрегации для 1000-летнего расчетного периода для одного из пунктов вдоль железнодорожной линии (интенсивность сотрясений — I = 6,5 балла; модельное землетрясение с M = 5,5; эпицентральное расстояние — R = 10 км; вклад — 23,1%)**

Саянского сейсмоактивного региона, что и Саяно-Шушенская ГЭС.

Здесь уместно еще раз напомнить, что методология ОСР-97 не допускает волевого (субъективного) перемещения границ между зонами балльности, как это делалось в былые советские времена «по экономическим соображениям». Согласно новой методологии ОСР-97 конфигурация сейсмических зон создается автоматически (математически) на основе зон ВОЗ и специальных расчетов вероятности ожидаемого сейсмического эффекта от них. Иными словами, сначала нужно детализировать зоны ВОЗ и их ЛДФ-модель, а затем после компьютерных вычислений посмотреть, как изменяются



**Рис. 15. Потенциальные очаги землетрясений Z1, Z2, Z3, представляющие наибольшую опасность для города Большой Сочи**

границы между зонами. В любом случае недопустимо вносить фрагментарные изменения в нормативные карты ОСР-97, которые могут превратиться в сложную (и ложную) мозаику. Можно лишь составлять самостоятельные карты ДСР, обсуждать их и утверждать в установленном порядке.

Однако, как это ни парадоксально, и теперь встречаются попытки «вручную» перемещать границы между зонами балльности карт ОСР-97 в угоду «экономическим соображениям» и в ущерб социально-экономической безопасности. Так, в 2008 году в Бюллетене строительной техники (БСТ, № 11) были опубликованы «Изменения к СНиП П-7-81\*». В преамбуле к ним приведена следующая информация: «Специализированный филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС» (Центр службы геодинамических наблюдений в энергетической отрасли), являющийся головной организацией по оценке сейсмической опасности, выполнил работы по уточнению исходной сейсмичности района расположения Богучанской ГЭС и получил снижение сейсмичности для указанного района на один балл...» Эти изменения, к сожалению, были даже внесены в СНиП П-7-81\* «в части карт ОСР-97-В и ОСР-97-С и списка населенных пунктов для Красноярского края (района Богучанской ГЭС)».

Не говоря уже о том, что неизвестно, кто и когда уполномочил «Инженерный центр ЕЭС» быть «головной организацией по оценке сейсмической опасности» в стране, полученные им результаты оказались принятыми без каких-либо научных обсуждений. И это несмотря на действительно профессиональные исследования, выпол-

ненные в 2007 году специалистами Красноярского НИИ геологии и минерального сырья (КНИИГиМС) и Экологического центра рационального освоения природных ресурсов (НП «ЭЦ РОПР», г. Красноярск), указавшими на недопустимость снижения оценок карт ОСР-97 не только для Богучанской ГЭС, но и для всего Нижнего Приангарья.

Говоря о Богучанской ГЭС и о волевой «актуализации» карт ОСР-97, не следует забывать о недавней катастрофе на Саяно-Шушенской ГЭС, расположенной, как и Богучанская, в пределах Алтае-Саянской сейсмоактивной области (рис. 10), хотя истинная причина этой катастрофы с высокой достоверностью не установлена.

Ниже в качестве иллюстрации действительно профессионального подхода к детализации ОСР-97 на юге Красноярского края приведены результаты, полученные весной 2009 года сибирскими учеными: доктором геолого-минералогических наук Р.М. Лобацкой (Институт земной коры СО РАН), кандидатом технических наук С.А. Перетокиным (НП «ЭЦ РОПР») и их сотрудниками — при оценке сейсмической опасности вдоль трассы железной дороги Курагино — Кызыл, расположенной в районе Саяно-Шушенской ГЭС (рис. 11–14, относящиеся к результатам этих работ, публикуются здесь с разрешения С.А. Перетокина).

На основе инструментальных наблюдений, произведенных достаточно плотной сетью сейсмических станций, открытых в этом районе в разное время как самими исполнителями (ЭЦ РОПР, КНИИГиМС), так и Геофизической службой Сибирского отделения РАН (ГС СО РАН), были дополнены и уточнены региональные каталоги землетрясений. За период с 2002 по 2009 год было зарегистрировано достаточно большое количество местных и близких землетрясений с магнитудой от  $2,5 \pm 0,2$  до  $5,0 \pm 0,2$  (см. рис. 11). Как видно, даже за столь короткий промежуток времени (менее 7 лет) в непосредственной близости от железной дороги и от СШ ГЭС произошли сейсмические события с  $M = 2,5 \pm 0,2$ .

Исследования по уточнению сейсмической опасности этого участка трассы были выполнены незадолго до аварии на СШ ГЭС, и перед исполнителями стояла иная задача, не связанная с ГЭС. Целью работы было выделение в районе трассы Курагино — Кызыл сейсмических линейментов меньших рангов (магнитуд) по сравнению с маг-

нитудами  $M \geq 6,0 \pm 0,2$ , принятыми в ОСР-97 за нижний уровень потенциала линейных структур, и уточнение местной сейсмической опасности.

Рассматривалась область шириной 100 км вокруг проектируемой железнодорожной линии (рис. 12). Исследования были выполнены строго в соответствии с методологией ОСР-97. Была пополнена база исходных данных ОСР-97, полученных после создания карт ОСР-97, для рассматриваемой территории. Была детализирована ЛДФ-модель зон ВОЗ в районе трассы и выделены линейные структуры (разломы) с  $M_{\max} \leq 5,5 \pm 0,2$ . Была выполнена структурная параметризация сейсмогенерирующих объемов (доменов), до этого характеризовавшихся в ОСР-97 рассеянной сейсмичностью.

Рисунок 12 иллюстрирует фрагменты (части) доменов D0300, D0301, D0308, D0316 и D0322 модели зон ВОЗ карт ОСР-97, попавшие в пределы изучаемой области (слева), и преобразование множества рассеянных эпицентров землетрясений с  $M = 5,5 \pm 0,2$  в структурированную сейсмичность линейных элементов (справа).

В соответствии с технологией ОСР-97 и реальным сейсмическим режимом в этих доменах удельная плотность потока сейсмических событий в каждом из них, измеряемая числом событий в год на единице площади 1000 кв. км, моделировалась каталогом, продленным на интервал времени в 500 тысяч лет (поэтому на рис. 12 такое множество эпицентров). Затем все это огромное число виртуальных «землетрясений», рассеянных в доменах, группировалось специальной программой вдоль линейных элементов. При этом общее число сейсмических событий в рассматриваемой области, естественно, не изменялось. Образно говоря, процесс состоял в том, чтобы эпицентры, представленные в виде песчинок, ровным слоем заполнявших сосуд, были собраны в упорядоченные «рядки», возвышающиеся над опустившимися участками между ними. Опустившиеся таким образом участки стали менее «сейсмоопасными» (целиковые блоки), чем были до этого преобразования. Над «рядками» же, наоборот, «опасность» возросла. Выявление целиковых блоков очень важно при выборе площадок для размещения особо ответственных объектов (например, атомных станций).

Для того чтобы получить новые, детализированные, расчетные величины сейсмической интенсивности, в том числе для более густой сетки площадок

и для нормативных интервалов времени (500, 1000 и 5000 лет), нужно сделать выборки из общего числа событий, уменьшив их количество в рассмотренных доменах в 1000 раз в случае детализации карты ОСР-97-А, в 500 раз — карты ОСР-97-В и в 100 раз — карты ОСР-97-С. Все это автоматически осуществляется программно-математическим обеспечением (ПМО) технологии ОСР-97.

В соответствии с вышеизложенным для 50-километровой полосы вокруг проектируемой ветки железнодорожной линии был выполнен расчет интенсивности сотрясений с интервалом в 0,1 балла для сетки приемников с шагом 2 км. Полученные данные представлены на рис. 13.

Сейсмические воздействия, рассчитанные для каждого пункта вдоль всей проектируемой трассы с шагом 9 км, были подвергнуты С.А. Перетокиным деагрегационному анализу в целях определения доминантных магнитуд землетрясений и эпицентральных расстояний, которые способствуют превышению допустимых величин сейсмической интенсивности. Гистограмма для одного из них приведена на рис. 14.

Такой деагрегационный анализ необходим, в частности, для определения местоположения и параметризации потенциальных очагов землетрясений (ПОЗ), представляющих наибольшую опасность для заданного пункта. На рис. 15 показано в качестве примера местоположение ПОЗ с магнитудой  $M = 7,0$  и  $M = 5,5$  в районе г. Большой Сочи. Для этих сценарных землетрясений были рассчитаны синтетические акселерограммы, использующиеся в расчетах реакции проектируемых сооружений на сейсмические воздействия.

### Заключение

В связи с интенсивным развитием строительства в сейсмоактивных регионах страны особое значение при-

обретает профессионализм в оценках возможных природных и природно-техногенных сейсмических воздействий на строительные объекты и окружающую среду.

Новая технология оценки сейсмической опасности, положенная в основу нормативных карт ОСР-97 — общего сейсмического районирования территории нашей страны — постепенно внедряется в практику инженерных изысканий для сейсмостойкого строительства. Дальнейшему совершенствованию методов и техники инженерно-сейсмологических изысканий, актуализации баз данных и самих карт ОСР-97 может способствовать новая Федеральная целевая программа (ФЦП) «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2009–2013 годы», утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 23.04.2009 г. № 365.

Одной из основных научно-исследовательских работ, предусмотренных этой ФЦП, является работа по теме «Создание и обеспечение функционирования единой информационной системы «Сейсмобезопасность России»». Эта тема связана с целым рядом других исследований по ФЦП, в частности с разработкой системы инженерно-сейсмометрических наблюдений (СИСН) для мониторинга сильных сейсмических воздействий.

Благодаря созданию 15 августа 2009 года при Министерстве регионального развития Российской Федерации Экспертной комиссии по сейсмостойкому строительству появилась возможность контроля качества проектов нормативных правовых актов Минрегиона России в области сейсмостойкого строительства, выработки предложений и рекомендаций по решению вопросов обеспечения безопасности зданий и сооружений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уломов В.И. Вероятностно-детерминированная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и сценарных землетрясений // Сейсмостойкое строительство. 2005. № 4. С. 60–69.
2. Уломов В.И. К оценке сейсмической опасности Приморского края // Инженерные изыскания. № 1. 2009. С. 40–47.
3. Уломов В.И. Оценка сейсмической опасности и актуализация инженерных решений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2008. № 3. С. 16–21.
4. Уломов В.И. Сейсмическая опасность на территории России // Бюлл. строит. техники. № 8. 1999. С. 9–12.
5. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.