

Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации

Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016

и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах

Главные редакторы: д. ф.-м. н. проф. В.И. Уломов, к. г.-м. н. М.И. Богданов

Заместители главных редакторов: к. т. н. С.А. Перетокин, к. г.-м. н. А.Л. Стром

Составители: В.И. Уломов, М.И. Богданов, В.Г. Трифонов, А.А. Гусев, Г.С. Гусев, К.Н. Акатова, Ф.Ф. Аптикаев, Т.И. Данилова, А.И. Кожурин, Н.С. Медведева, А.А. Никонов, С.А. Перетокин, Б.Г. Пустовитенко, А.Л. Стром

Рецензенты: Г.Ш. Аминтаев, А.И. Савич

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1. МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКТА КАРТ ОСР-2016

2. МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКОВ (ОЧАГОВЫХ ЗОН) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

- 2.1. Исходные данные для построения модели зон ВОЗ
 - 2.1.1. Сейсмологические данные
 - 2.1.2. Сеймотектонические данные
- 2.2. Построение модели зон ВОЗ
 - 2.2.1. Принципы выделения и параметризации сейсмолинеаментов
 - 2.2.2. Принципы выделения и параметризации доменов
 - 2.2.3. Дополнительные параметры зон ВОЗ

3. МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

- 3.1. Модель зависимости «интенсивность — расстояние — магнитуда» для протяженных очагов
- 3.2. Определение зависимости «интенсивность — магнитуда — расстояние» для территорий, покрываемых комплектом карт ОСР-2016
- 3.3. Задание параметров разброса для модельной зависимости «интенсивность — расстояние — магнитуда»
- 3.4. Представление данных о сейсмических воздействиях на картах общего сейсмического районирования. Интенсивность в баллах и ее соотношение с физическими параметрами движений грунта

4. РАСЧЕТЫ И ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ОСР-2016

- 4.1. Обзор существующих программных средств для оценки сейсмической опасности и сейсмического районирования. Выбор алгоритма и его доработка
- 4.2. Алгоритмы программного пакета PRB и содержание результатов расчета
 - 4.2.1. Исходные данные для расчета
 - 4.2.2. Создание модельного каталога
 - 4.2.3. Накопление статистики сотрясений
 - 4.2.4. Расчет характеристик опасности
 - 4.2.5. Формальный смысл значений I_T

5. КОМПЛЕКТ ВЕРОЯТНОСТНЫХ КАРТ ОСР-2016

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. УЧАСТНИКИ РАБОТ ПО СОСТАВЛЕНИЮ КОМПЛЕКТА КАРТ ОБЩЕГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ОСР-2016

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СПИСОК НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОНАХ

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по совершенствованию нормативных карт ОСР-97 и методологии их создания проводились в связи с реализацией федеральной целевой программы (ФЦП) «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2009–2013 годы», утвержденной постановлением Правительства РФ № 365 и затем продленной до 2018 года. Эта ФЦП способствовала более тесному сотрудничеству академических и отраслевых институтов и организаций и активизации научно-исследовательских работ, связанных с уточнением сейсмической опасности на территории страны и актуализацией нормативных документов, направленных на обеспечение сейсмической безопасности.

В 2009–2012 гг. в ОАО «Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве» (ОАО «ПНИИИС») был собран коллектив ведущих специалистов, в том числе из Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, других академических и отраслевых институтов и организаций из разных регионов страны, работающих в области общего сейсмического районирования. Этим коллективом была выполнена большая работа по актуализации карт ОСР-97, осуществленной в виде расширенного комплекта карт ОСР-97* [38] в составе разработанной в те годы в ОАО «ПНИИИС» единой информационной системы «Сейсмобезопасность России». Одновременно по инициативе участников исследований была начата работа по созданию макетов новых карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2012 [45; 46], предназначенных для возможной замены действующих нормативных карт ОСР-97, созданных в 1991–1997 гг. и действующих уже свыше 15 лет, в то время как предыдущие карты ОСР территории СССР традиционно обновлялись в среднем каждые 10 лет (1937, 1949, 1957, 1968, 1978 гг.).

После опубликования макетов карт ОСР-2012 [38–40; 42; 45; 46] и широкого их обсуждения научной общественностью стала очевидна необходимость их дальнейшего совершенствования, которое продолжалось в течение 2013–2015 гг. и завершилось созданием макетов карт ОСР-2016, основанных на модифицированной базе исходных данных ОСР-2012 и ОСР-2014, дополненных территорией Крыма, характеризующейся высокой сейсмической активностью [21; 22].

Другим различием карт ОСР-2012 и ОСР-2014 являлось использование при их расчетах и построениях разных моделей сейсмического режима — классической экспоненциальной в ОСР-2012 и комбинированной экспоненциально-гистограммной (подобной впервые примененной в ОСР-97 [47; 48]) в ОСР-2014.

Работа по последовательной актуализации карт ОСР-2012/2014 была завершена в конце 2015 г. Эти карты получили наименование ОСР-2016. Как и при создании карт ОСР-97, исследования продолжались в течение 7 лет. При составлении окончательного варианта карт были полностью учтены рекомендации расширенного заседания Научного совета РАН по проблемам сейсмологии, состоявшегося 24.10.2013 г., на котором обсуждались методология работ по совершенствованию общего сейсмического районирования территории РФ [42] и комплект карт ОСР-2012.

Созданный в результате работ 2014–2015 гг. комплект актуализированных карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 предлагается в качестве нормативного документа для осуществления сейсмостойкого строительства взамен действующих с 1997 г. карт ОСР-97.

В состав рабочей группы ОСР-2012/2014/2016 вошли специалисты, приглашенные ее руководителями В.И. Уломовым (ИФЗ РАН) и М.И. Богдановым (ОАО «ПНИИИС», ООО «ИГИИС»), являющимися также главными редакторами комплекта карт ОСР-2016. Заместителями главных редакторов являются С.А. Перетокин (сейсмология, сейсмогеодинамика) и А.Л. Стром (геология, сеймотектоника).

В пояснительной записке изложены основы методологии составления нового комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. На картах ОСР-2016 А, В и С отображена интенсивность максимальных расчетных сейсмических воздействий при вероятности их превышения, равной соответственно 10, 5 и 1% за 50 лет, что позволяет использовать их при территориальном планировании, градостроительном зонировании, планировке территорий, архитектурно-строительном проектировании, строительстве, капитальном ремонте, реконструкции объектов капитального строительства, эксплуатации зданий и сооружений различных уровней ответственности в соответствии со статьей 4 Федерального закона № 384-ФЗ от 30 декабря 2009 года «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и СП 14.13330-2014. Комплект карт ОСР-2016 дополнен картой D, предназначенной для объектов атомной отрасли в соответствии с требованиями МАГАТЭ [4].

Авторы основных разделов пояснительной записки:

- В.И. Уломов — главный научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), д. ф.-м. н., профессор (введение, разделы 1–5, заключение);
- М.И. Богданов — генеральный директор Института геотехники и инженерных изысканий в строительстве (ООО «ИГИИС»), к. г.-м. н. (введение, заключение);
- В.Г. Трифонов — главный научный сотрудник Геологического института РАН (ГИН РАН), д. г.-м. н., профессор (разделы 2.1.2, 2.2.1);
- А.А. Гусев — заведующий лабораторией сейсмологии Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, д. ф.-м. н. (разделы 2–4);
- Г.С. Гусев — главный научный сотрудник Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ), д. г.-м. н. (раздел 2.2.2);
- К.Н. Акатова — старший научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) (раздел 2.1.1);
- Ф.Ф. Аптикаев — главный научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), д. ф.-м. н., профессор (раздел 3.4);
- Т.И. Данилова — старший научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), к. г.-м. н. (раздел 2.1.1);

- А.И. Кожурин — заведующий лабораторией геодинамики и геофизики Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, д. г.-м. н. (разделы 2.1.2, 2.2.1);
- Н.С. Медведева — старший научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) (раздел 2.1.1);
- А.А. Никонов — главный научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), д. г.-м. н., профессор (раздел 2.1);
- С.А. Перетокин — заведующий лабораторией геодинамических и экологических рисков Красноярского филиала Института вычислительных технологий СО РАН, к. т. н. (разделы 2.2, 3–5);
- Б.Г. Пустовитенко — ведущий научный сотрудник Института сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, д. ф.-м. н. (разделы 2.1, 3.3);
- А.Л. Стром — главный эксперт филиала АО «Институт Гидропроект» — ЦСГНЭО, к. г.-м. н. (разделы 2.1.2, 2.2.1).

Рецензенты:

- Г.Ш. Аминтаев — директор Северо-Кавказского научного центра сейсмостойкого строительства (г. Махачкала);
- А.И. Савич — директор филиала АО «Институт Гидропроект» — ЦСГНЭО, д. ф.-м. н., академик РАЕН.

1. МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКТА КАРТ ОСР-2016

Как уже отмечено выше, методология общего сейсмического районирования ОСР-2016 соответствует методологии ОСР-97 и дает вероятностную оценку сейсмической опасности.

В основу вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) положены две взаимосвязанные сейсмогеодинамические модели (рис. 1) — модель очаговых зон (МОЗ) и модель сейсмического эффекта (МСЭ) [47; 48].



Рис. 1. Концепция методологии общего сейсмического районирования

Концептуально каждая из этих моделей отражает структурно-динамическое единство природной среды и вероятностный характер развивающихся в ней сейсмогеодинамических процессов. Обе модели создаются на основе трех блоков базы исходных данных («современная геодинамика», «региональная сейсмичность», «сильные движения грунта») и соответствующим образом параметризуются на основе наблюдаемых регионального и локального режимов возникновения землетрясений разных магнитуд M . Здесь и далее обозначение M соответствует магнитудам M_{LH} и M_S , определяемым по поверхностным сейсмическим волнам. В расчетах модели МСЭ используется моментная магнитуда M_W . В таблице 1 приведены принятые соотношения между указанными типами магнитуд [8].

Таблица 1

Пересчет магнитуд M_{LH} (M_S) в M_W

Тип магнитуды	Значение										
M_{LH} (M_S)	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
M_W	4,25	4,62	5,02	5,43	5,83	6,23	6,63	7,00	7,50	8,00	8,90

Обе модели (МОЗ и МСЭ) реализуются на основе компьютерного моделирования прогнозной (виртуальной) сейсмичности. Сейсмический эффект, ожидаемый на земной поверхности исследуемой территории с той или иной вероятностью в течение заданного интервала времени, рассчитывается с помощью специального программного обеспечения и отображается средствами географических информационных систем (ГИС).

В отличие от подхода к вероятностному зонированию сейсмической опасности, примененному, к примеру, при составлении карты GSHAP [55–58], в данном случае в каждой из моделей (МОЗ и МСЭ) очаги землетрясений представлены не в виде точек (гипоцентров), а в форме протяженных сейсмических источников, размеры которых связаны с их магнитудами, что учитывается в расчетах и описано в работах [5; 7; 8; 29–31; 47; 48]. Графически такие очаги отображаются в виде эллипсов (рис. 2).

Неопределенности, всегда существующие в природе, а также неполнота знаний и разного рода погрешности в определении физических параметров очагов землетрясений и в оценке их сейсмических эффектов делают нерациональным применение сугубо детерминистского подхода к общему сейсмическому районированию, реализованного при составлении карт общего сейсмического районирования территории СССР в 1937, 1949, 1957, 1968 и 1978 гг. [24].

Преимущество вероятностного анализа сейсмической опасности перед детерминистским анализом (ДАСО), обусловившее широкое применение этого подхода, состоит в том, что он позволяет оценить риск возникновения и возможного превышения сейсмических воздействий прогнозируемой интенсивности.

2. МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКОВ (ОЧАГОВЫХ ЗОН) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В соответствии с принятой концепцией в основу карт ОСР-2016 положена линеаментно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), впервые разработанная при составлении карты ОСР-97 (рис. 2). В этой модели рассматриваются четыре масштабных уровня источников землетрясений — крупный и генетически единый регион с интегральной характеристикой сейсмического режима и три его основных структурных элемента: *сейсмолинеаменты (СЛ)* — оси трехмерных сейсмоактивных разломных структур, отражающие структурированность сейсмичности и являющиеся основным каркасом ЛДФ-модели; *сейсמודомены (СД)*, охватывающие квазиоднородные в геодинамическом отношении объемы геологической среды и характеризующиеся «рассеянной» сейсмичностью; *потенциальные очаги землетрясений (ПОЗ)*, соответствующие фрагментам сейсмолинеаментов с установленной для них повторяемостью характерных землетрясений.

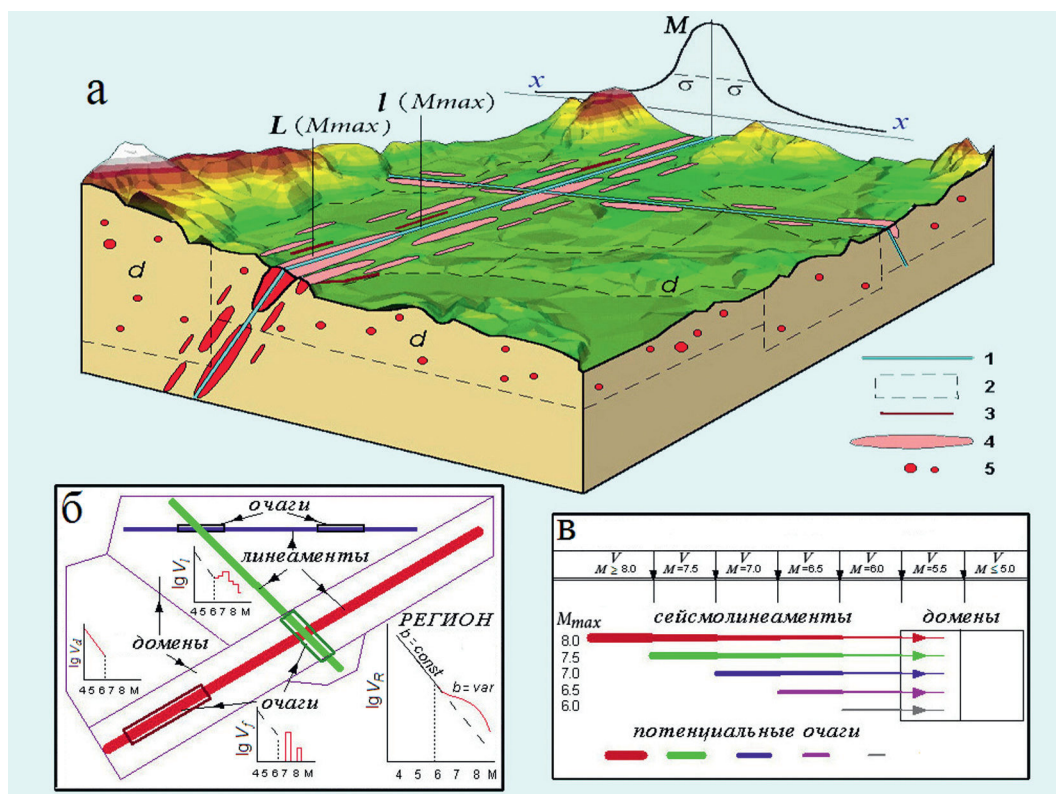


Рис. 2. Объемная линеаментно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) (график на заднем плане — условное распределение очагов землетрясений разных магнитуд M , возникающих на разных расстояниях x от оси сейсмолинеаментов при стандартном отклонении σ) (а); основные структурные элементы региона — сейсмолинеаменты, домены, потенциальные очаги и типичные графики среднегодовой скорости потока сейсмических событий во всем регионе (V_R), в составляющих его линеаментов (V_L), доменах (V_D) и потенциальных очагах землетрясений (V_P) (б); распределение среднегодовых потоков числа сейсмических событий (V) по интервалам магнитуд (M) между ЛДФ-структурами (вдоль линеаментов, внутри доменов и в потенциальных очагах землетрясений) (в). Условные обозначения: 1 — сейсмолинеаменты; 2 — условные границы сейсмических доменов; 3 — активные разломы; 4 — линейные размеры потенциальных очагов крупных землетрясений с максимально возможными магнитудами $M_{max} \geq 7,0 \pm 0,2$; 5 — линейные размеры потенциальных очагов землетрясений с $M_{max} \leq 6,5 \pm 0,2$; M_{max} — максимальные магнитуды для сейсмолинеаментов и очагов с шагом 0,5; l, L — протяженность сейсмолинеаментов и очагов крупных землетрясений соответственно

Регион является основной единицей общего сейсмического районирования, включающей квазиоднородные в сейсмогеодинамическом отношении зоны ВОЗ, для которых предполагается единообразный сейсмический режим, используемый для параметризации основных структур ЛДФ-модели (см. рис. 2). Рисунок 3 иллюстрирует фрагмент актуализированной схемы общей сейсмической регионализации Северной Евразии, первоначально разработанной для выполнения исследований по ОСР-97 и участия в международной программе глобальной оценки сейсмической опасности GSHAP [47; 48; 55; 56; 58]. В таблице 2 приведены наименования и площади регионов, выделенных на рис. 3, а также оценки максимально возможных магнитуд землетрясений в каждом из них.

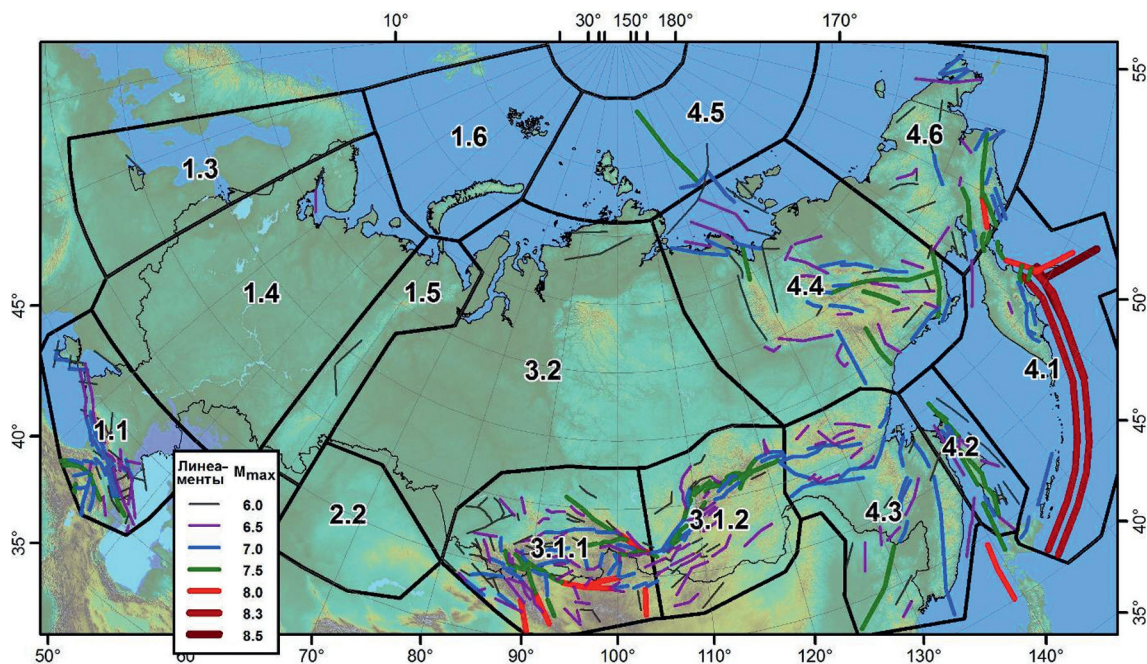


Рис. 3. Фрагмент актуализированной схемы регионализации Северной Евразии для территории России. Регионы: 1.1 — Крымско-Кавказский; 1.3 — Прибалтийский; 1.4 — Восточно-Европейский; 1.5 — Уральский; 1.6 — Новоземельский; 2.2 — Центрально-Казахстанский; 3.1.1 — Алтае-Саянский; 3.1.2 — Байкальский; 3.2 — Западно-Сибирский; 4.1 — Курило-Камчатский; 4.2 — Сахалинский; 4.3 — Приамуро-Приморский; 4.4 — Верхоянский; 4.5 — Североземельский; 4.6 — Чукотско-Корякский (регионы 1.2, 2.1 находятся за пределами территории Российской Федерации). Показана соответствующая им линеаментная модель зон ВОЗ

Таблица 2

Площади и максимально возможные магнитуды землетрясений регионов в соответствии с ОСР-2016

Регион		Площадь, 10 ³ км ²	$M_{max} \pm 0,2$
№	Наименование		
1.1	Крымско-Кавказский	1 393	7,5
1.3	Прибалтийский	1 853	5,5
1.4	Восточно-Европейский	3 837	6,5
1.5	Уральский	1 016	6,0
1.6	Новоземельский	1 803	4,5
2.2	Центрально-Казахстанский	1 078	5,5
3.1.1	Алтае-Саянский	1 945	8,0
3.1.2	Байкальский	1 527	8,0
3.2	Западно-Сибирский	5 169	6,0
4.1	Курило-Камчатский	2 971	8,5
4.2	Сахалинский	600	7,5
4.3	Приамуро-Приморский	2 112	7,5
4.4	Верхоянский	3 726	7,5
4.5	Североземельский	2 209	7,5
4.6	Чукотско-Корякский	2 669	8,0

Сейсмолинеаменты классифицируются по величине максимальной магнитуды (M_{max}) с шагом 0,5 и с точностью $\pm 0,2$ единиц магнитуды M . Минимальное значение магнитуды M_{min} землетрясений вдоль сейсмолинеаментов при ОСР принято равным 6,0 (или 5,8+0,2), поскольку при генерализованном районировании, каковым является ОСР, очаги с меньшей магнитудой выделяются недостаточно надежно. В ряде случаев при уточнении сейсмической опасности в ходе детального

сейсмического районирования (ДСР) нижний порог магнитуд для сейсмолинеаментов может быть уменьшен, но не ниже, чем до 5,5, так как в настоящее время невозможно уверенно связывать очаги с меньшими магнитудами (и, соответственно, с намного меньшими линейными размерами) с конкретными геологическими структурами из-за недостаточной изученности геологического строения на тех глубинах, на которых возникают очаги землетрясений. Поскольку линеаменты в подавляющем большинстве случаев являются генерализованными отображениями активных разломов, реальные очаги не располагаются в плане строго на линеаментах, а некоторым образом отклоняются в обе стороны от них. Поэтому при моделировании виртуальной сейсмичности используются функции статистического распределения пространственного положения очагов. При этом принимается, что чем меньше магнитуды землетрясений, тем дальше от сейсмолинеаментов могут отклоняться их очаги, и наоборот, крупные сейсмические события тяготеют к линеаментам.

Сейсмодомены покрывают всю исследуемую территорию без пробелов и пересечений. Считается, что очаги землетрясений с $M \leq 5,7$ случайным образом распределены в пределах СД. Перекрывать друг друга в плане домены могут, лишь будучи отнесенными к разным интервалам глубин (как, например, на Камчатке, в расположенных за пределами России зонах Вранча, Гиндукушской и др.).

Потенциальные очаги землетрясений — это сейсмолинеаменты с постоянными (характерными) значениями магнитуд связанных с ними землетрясений. ПОЗ включаются в модель зон ВОЗ при наличии достоверных данных о повторяемости землетрясений фиксированной магнитуды на конкретном активном разломе или его части. При распределении удельного потока сейсмических событий ПОЗ рассматриваются как очаги характерных землетрясений с высокими магнитудами, графики повторяемости которых проходят выше стандартных [53]. Нижнее значение магнитуды M для ПОЗ принято равным $7,0 \pm 0,2$. Это обусловлено тем, что достоверные данные о повторяемости землетрясений на конкретном разломе или его сегменте в сочетании с оценкой их магнитуды в большинстве случаев обеспечивают палеосейсмологические исследования [19; 20; 49]. Это весьма актуально в условиях России, для большей части территории которой исторические данные о сильных землетрясениях имеются за ограниченный промежуток времени. При этом вероятность выхода на поверхность очаговых разрывов землетрясений с меньшими магнитудами весьма мала [25].

2.1. Исходные данные для построения модели зон ВОЗ

Выделение зон ВОЗ производится путем комплексного анализа двух групп исходных данных — сейсмологических и геолого-геофизических (рис. 4). Поскольку для корректной оценки сейсмической опасности территории России необходимо учесть влияние крупных землетрясений, происходящих и за ее пределами, учитываются сейсмотектонические и сейсмологические данные в пределах 300-километровой буферной зоны за границами РФ (ее ширина принята с учетом затухания сейсмического эффекта крупных землетрясений).



Рис. 4. Принципиальная схема работ по выделению зон ВОЗ

2.1.1. Сейсмологические данные

Основой любого сейсмического районирования является каталог землетрясений, однородный (унифицированный) по содержанию и представительный (на уровне современной изученности) для всей исследуемой территории. В период работы над комплектом карт ОСР-97 для территории России и сопредельных регионов на основе каталога, составленного под ре-

дакцией Н.В. Кондорской и Н.В. Шебалина [18], был создан унифицированный каталог землетрясений Северной Евразии (УКЗ) под редакцией Н.В. Кондорской и В.И. Уломова. В дальнейшем УКЗ был дополнен данными по 2014 г. при участии Геофизической службы РАН. В период 1992–1999 гг. благодаря участию Института физики Земли (ИФЗ РАН) в международной программе «Глобальная оценка сейсмической опасности» (Global Seismic Hazard Assessment Program — GSHAP) форматы каталогов были гармонизированы с европейскими стандартами [55–58]. Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии (СКЗ/SECNE), составленный Н.В. Кондорской и В.И. Уловым для GSHAP, был продолжен Н.С. Медведевой при участии И.П. Габсатаровой, Б.Г. Пустовитенко и под руководством В.И. Уломова. Сводный перечень исходных данных, использованных при составлении каталога, положенного в основу карт ОСР-2016, приведен на рис. 5.



Рис. 5. Хронология каталогизации землетрясений, произошедших на территории Российской империи, СССР, Российской Федерации

СКЗ отличается от УКЗ результатами ряда технических преобразований, необходимыми для выполнения работ по ОСР-2012/2014/2016. В частности, СКЗ дополнен данными о протяженности и ориентации очагов крупных землетрясений ($M_s \geq 6,8$); в нем дана оценка представительности сейсмических событий разных магнитуд за инструментальный и доинструментальный периоды времени. В отличие от УКЗ специализированный каталог адаптирован для использования в ГИС. В связи с тем что для оценки сейсмических условий территории РФ учитывались сведения о сейсмичности и сейсмотектонике полосы шириной 300 км за пределами границ страны, в каталог включены сведения и о землетрясениях, произошедших в пределах этой зоны.

Наряду с общепринятым для каталогов представлением магнитуд землетрясений с точностью до десятых долей в СКЗ представлены магнитуды M_s с шагом 0,5 и округлением $\pm 0,2$ ($3,5 \pm 0,2$; $4,0 \pm 0,2$; $4,5 \pm 0,2$ и т.д.). Такая дифференциация соответствует принятому шагу ранжирования площадных и линейных зон ВОЗ по значению максимально возможной магнитуды M_{max} . При этом интервал $\pm 0,2$ соответствует точности определения магнитуд.

Землетрясения, включенные в СКЗ, представляются в ГИС двояким образом — в виде точек и в виде геометрических фигур (эллипсов, кружков). Начиная с 1960 года в СКЗ добавлены сведения о землетрясениях с $M_s \geq 3,3$ (эта величина является представительной для всей рассматриваемой территории).

Общее количество всех землетрясений в СКЗ превышает 30 000.

Актуализация каталога за период доинструментальных и ранних инструментальных наблюдений (до 1961 г.). В ряде регионов, в первую очередь в пределах европейской части страны, макросейсмические сведения по каждому известному землетрясению собирались и анализировались с точки зрения их достоверности, представительности и полноты (неполноты). Эта работа проводилась на основании анализа письменных первоисточников, в том числе заново обнаруживаемых, отдельно по субрегионам. В сущности, для территорий Восточно-Европейской платформы и прилежащих к ней частей Скифской и Туранской плит, восточной Балтики, а также Урала получена более полная и уточненная версия каталога за период до 1961 года. За нижний порог магнитуды M взято значение 2,5, учтены все повторные толчки и рои, выделены события тектонического генезиса и исключены нетектонические толчки (провальные, морозобойные, импактные и др.). Землетрясения раннего инструментального периода обрабатывались с учетом и инструментальных записей, и собранных, в том числе заново, макросейсмических данных. Интенсивность, глубина очага и магнитуда M_s этих событий уточнялись по существующим уравнениям макросейсмического поля и номограммам. Определялся также возможный разброс этих параметров.

Для некоторых субрегионов, в том числе в европейской части страны, каталоги дополнены подкаталогами палеоземлетрясений, составленными по археосейсмическим и геолого-геоморфологическим данным. Для палеоземлетрясений, сопровождавшихся образованием поверхностных разрывов, оценки магнитуд осуществлялись на основе известных сейсмотектонических соотношений [13; 26; 27; 29–32; 50; 59]. Эти данные имеют принципиальное значение для выделения потенциальных очагов землетрясений, оценок максимальных магнитуд M_{max} и повторяемости сильных землетрясений.

Исследование распределения очагов землетрясений разных магнитуд по глубине. Для определения толщины и положения сейсмоактивного слоя на рассматриваемой территории исследовались распределения по глубине очагов (гипоцентров) землетрясений разных магнитуд. Полученные результаты использованы для параметризации основных структурных элементов модели источников землетрясений (сейсмолинементов, доменов и потенциальных очагов).

Определение представительности (репрезентативности) исходных данных в региональных каталогах. Для адекватного определения параметров сейсмического режима (плотности потока сейсмических событий разных магнитуд) в каждом из ре-

гионов и в основных сейсмогенерирующих структурах (сейсмолинеаментах, доменах и потенциальных очагах) оценивалась надежность используемых данных, в том числе путем построения графиков последовательности возникновения во времени сейсмических событий разных магнитуд (графиков накопления по интервалам $0,5 \pm 0,2$) и их анализа на стационарность.

2.1.2. Сейсмотектонические данные

Цель сейсмотектонических исследований — выделение и параметризация сейсмогенерирующих структур для создания модели зон возникновения очагов землетрясений. Зоны ВОЗ выделяются и параметризуются путем комплексного анализа сейсмологических и сейсмотектонических данных. Как отмечено выше, выделяются линейные (активные разломы, которые в рамках принятой модели описываются в генерализованном виде как сейсмолинеаменты) и площадные (домены) зоны ВОЗ. Методы их выделения и параметризации различаются и далее рассматриваются отдельно.

Положение и размеры тектонических структур, рассматриваемых в качестве зон ВОЗ, а также характер и кинематика новейших и современных тектонических деформаций определяются геолого-геофизическими и геоморфологическими методами с использованием результатов повторных геодезических измерений, среди которых ведущая роль принадлежит GPS-наблюдениям. Возраст этих деформаций определяется методами абсолютной и относительной геохронологии. Наиболее широко используемым для оценки сейсмической опасности типом активных структур являются активные разломы. Именно они являются структурной основой выделяемых сейсмолинеаментов, с которыми связаны очаги землетрясений с $M_{max} > 5,8$. Изучение соотношений магнитуд инструментальных землетрясений с длиной сопровождавших их сейсмогенных разрывов земной поверхности и смещений по ним позволило установить статистические соотношения между этими характеристиками, которые используются для оценки сейсмического потенциала (M_{max}) сейсмолинеаментов.

2.2. Построение модели зон ВОЗ

Важнейшими характеристиками зон ВОЗ, используемыми при ВАСО, наряду с их положением на районируемой территории и размерами являются максимальная возможная магнитуда связанных с ними землетрясений (M_{max}) и их повторяемость.

Согласно разработанной для задач ОСР методологии сейсмический режим каждого структурного элемента зон ВОЗ (СЛ, СД, ПОЗ) обусловлен общим потоком сейсмических событий V_{RM} в соответствующем регионе (субрегионе). Региональный поток V_{RM} вычисляется на основе СКЗ, очищенного от афтершоков и других групповых событий (роев, форшоков), с учетом продолжительности представительной регистрации сейсмических событий разных магнитуд в рассматриваемом регионе. Для каждого интервала магнитуд $\Delta M_s = \pm 0,2$ с шагом 0,5 определяется средняя долговременная величина V_{RM} во всем регионе. Простейшим и достаточно надежным способом определения повторяемости сейсмических событий разных магнитуд является построение графиков последовательности возникновения сейсмических событий (графиков накопления) по интервалам $\pm 0,2$ с шагом 0,5 единиц M_s (рис. 6). По тангенсу угла наклона таких графиков на протяженном по стационарности отрезке времени определяется период T повторяемости соответствующих событий, а по арктангенсу — среднегодовая плотность потока.



Рис. 6. Графики повторяемости землетрясений с $M_s \geq 6,0$ и периоды их повторяемости для разных регионов

2.2.1. Принципы выделения и параметризации сейсмолинеаментов

Сейсмолинеаменты, как правило, представляют собой генерализованное отображение крупных активных разломов (зон активных разломов). Сейсмотектоническая оценка параметров СЛ делается на основе совместного анализа данных об инструментальных, исторических и палеоземлетрясениях и результатов геолого-геоморфологических исследований зон активных разломов.

Для использования в процедуре вероятностного анализа сейсмической опасности линейные зоны ВОЗ описываются прямыми линиями. При этом указываются начальные и конечные координаты линеамента. В случаях, когда протяженная разломная зона имеет существенно непрямолинейную форму, в модели зон ВОЗ она аппроксимируется несколькими линеаментами. При этом длина каждого линеамента должна быть не меньше протяженности очага землетрясения с принятым для СЛ значением M_{max} .

Оценка M_{max} сейсмолинеаментов производится на основе эмпирических соотношений между M_{max} и длиной разрыва L или сейсмогенной подвижкой D , выведенных по данным о землетрясениях, сопровождавшихся возникновением сейсмогенных разрывов [13; 26; 27; 29–33; 35–37; 50; 59]. Для многих сейсмолинеаментов вследствие недостаточной изученности образующих их активных разломов нет данных, позволяющих определить истинную протяженность участков, вскрывающихся при единовременной подвижке. Известны как землетрясения, при которых активизировалось несколько достаточно обособленных разломов или их сегментов, так и землетрясения, охватившие лишь часть активного разлома. Поскольку разлом редко активизируется при землетрясении на всем протяжении, оценка M_{max} , соответствующая длине всего сейсмолинеамента, обычно отражает ее верхний предел. Оценки M_{max} , полученные по протяженности активного разлома или его сегмента, сопоставлялись с оценками, полученными по соотношениям между магнитудой и величиной одноактного сейсмогенного смещения по разлому, а также с магнитудами известных землетрясений, связанных с исследуемым сейсмолинеаментом. Итоговые оценки M_{max} , использованные в расчетной модели зон ВОЗ, получены экспертным путем на основе сопоставления оценок, полученных разными сейсмологическими и геологическими методами с учетом их достоверности. Очевидно, что итоговая оценка M_{max} не может быть меньше магнитуды крупнейшего известного землетрясения, связанного с исследуемым линеаментом и включенного в СКЗ.

Для оценки глубины очагов потенциальных землетрясений помимо имеющихся сейсмологических данных привлекались геофизические данные и модели глубинного строения территории, основанные на их совместной интерпретации с геологическими данными, относящимися прежде всего к новейшему этапу ее развития.

Поскольку сейсмический режим каждого структурного элемента зон ВОЗ (СЛ, СД, ПОЗ) обусловлен общим потоком сейсмических событий V_{RM} в соответствующем регионе или его квазиоднородной части, этот поток распределяется между всеми сейсмолинеаментами в соответствии с их протяженностью и рангом (величиной M_{max}). С этой целью в каждом из регионов вычисляется суммарная длина соответствующих линеаментов ΣL_M , складывающаяся из длин всех линеаментов этого и более высоких рангов $\Sigma(L_{M_{max} \geq M})$, поскольку линеаменты с M_{max} включают в свою зону динамического влияния и все события с $M < M_{max}$ вплоть до выбранной для ОСР минимальной магнитуды землетрясений, относимых к сейсмолинеаментам ($M_{min} = 5,8$). Затем вычисляется среднегодовая повторяемость $V_i(M)$ событий соответствующей магнитуды M_S вдоль каждого из линеаментов длиной L_i , как доля V_{RM} — общего потока событий такой магнитуды на выбранной территории:

$$V_i(M) = L_i \cdot V_{RM}(M) / \Sigma L_{M_{max} \geq M} \quad (1)$$

где $V_i(M)$ — повторяемость на i -м линеаменте землетрясений с магнитудой M ; L_i — длина i -го линеамента; $V_{RM}(M)$ — повторяемость землетрясений с магнитудой M в регионе; $\Sigma L_{M_{max} \geq M}$ — сумма длин линеаментов с M_{max} , большей или равной магнитуде M .

Конфигурация графиков повторяемости землетрясений в каждой из таких структур в суммарном виде должна совпадать с графиком повторяемости для всего соответствующего региона.

Для линеаментов, по которым есть достоверная информация о повторяемости землетрясений конкретных магнитуд (например, ПОЗ), параметр $V_i(M)$ задается индивидуально. При этом при параметризации остальных линеаментов по уравнению (1) указанная повторяемость вычитается из общерегиональной.

2.2.2. Принципы выделения и параметризации доменов

Сейсмическая опасность определяется не только сильнейшими землетрясениями (с $M \geq 6,0 \pm 0,2$), очаги которых приурочены к достаточно уверенно выделяемым крупным активным разломам (сейсмолинеаментам при мелкомасштабном районировании уровня ОСР), но и землетрясениями сравнительно малых магнитуд ($M \leq 5,5 \pm 0,2$), эффекты которых в пределах их очаговых зон также могут быть весьма значительными. Достаточно вспомнить знаменитое Ташкентское землетрясение 1966 года с $M = 5,2$. Очаги таких землетрясений также приурочены к разломам и иным неоднородностям в земной коре, но их линейные размеры малы — обычно менее 5 км [59]. Очаги даже коровых землетрясений располагаются на глубинах в десятки километров, и мы в большинстве случаев не располагаем сведениями о строении земной коры, достаточно детальными для того, чтобы выделять структуры, с которыми могут быть связаны очаги землетрясений с $M \leq 5,5 \pm 0,2$.

Поэтому для описания условий возникновения таких землетрясений при проведении сейсмического районирования принята модель рассеянной сейсмичности, согласно которой их очаги возникают случайным образом в пределах некоторых блоков земной коры (литосферы), рассматриваемых как площадные (объемные) зоны ВОЗ — домены.

В отличие от сейсмолинеаментов (активных разломов), принципы выделения которых многократно описаны и в достаточной степени формализованы [15–17; 28 и др.], критерии выделения доменов как сейсмогенерирующих структур в определенной мере субъективны, поскольку перечень факторов, которые теоретически могут влиять на возникновение землетрясений, весьма широк и определяется как взглядами исследователей, так и геолого-геоморфологической, геофизической и сейсмологической изученностью территории.

В ряде случаев выделение доменов отражает степень изученности территории: при более детальном изучении в пределах доменов иногда устанавливаются линейно ориентированные кластеры гипоцентров землетрясений и даже активные разломы, но их сейсмический потенциал меньше, чем у разломов, которым соответствуют сейсмолинеаменты. Поэтому M_{max} доменов принимается не выше $M_S = 5,7$, за исключением зоны субдукции в пределах Курило-Камчатского региона, которой соответствует объемный домен (фокальная область) с $M_{max} = 8,0$. При выделении и параметризации доменов учитывались интенсивность и дифференцированность новейших (последние миллионы лет) тектонических движений, хотя эти характеристики и не связаны напрямую с M_{max} землетрясений и периодом их повторяемости.

При работах по составлению карт ОСР-2012/2014/2016 за основу была взята модель тектонического и неотектонического районирования, разработанная под руководством Г.С. Гусева [10, 11]. В этой модели домен рассматривается как пространственно локализованный целостный объект с многофакторным взаимодействием его основных компонентов в плане и по глубине. Домены разделены на 10 классов по степени активности тектонических (геодинамических) процессов, каждый из которых характеризуется свойственным ему набором признаков — тектонических (геодинамическая обстановка), морфоструктурных (высота рельефа, его контрастность), геофизических (величина теплового потока, аномалия силы тяжести, мощность земной коры и литосферы), а также степенью унаследованности структурных, кинематических и динамических особенностей формирования новейших геологических тел от таковых на предшествующих этапах развития территории. Карта доменов, использованная как исходная при ОСР-2016, приведена на рис. 7.

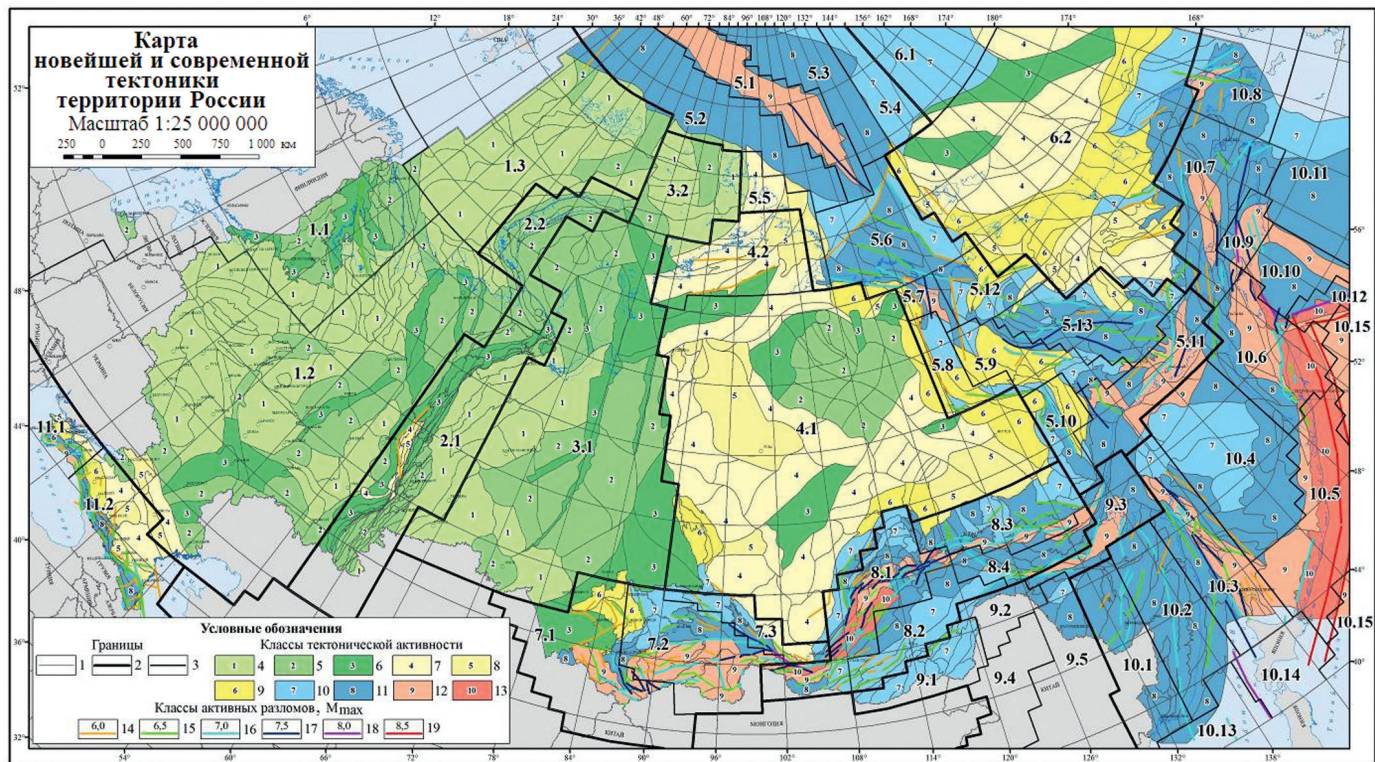


Рис. 7. Карта новейшей и современной тектоники территории России [11]. Условные обозначения: границы: 1 — домены (тектонических зон, бассейнов), 2 — сейсмогеодинамических регионов, 3 — сейсмогеодинамических секторов; секторы Европейского региона: 1.1 — Балтийский; 1.2 — Восточно-Европейский, 1.3 — Баренцевский; секторы Урало-Новоземельского региона: 2.1 — Уральский, 2.2 — Новоземельский; секторы Западно-Сибирского региона: 3.1 — Западно-Сибирский, 3.2 — Карский; секторы Сибирско-Таймырского региона: 4.1 — Восточно-Сибирский, 4.2 — Таймыро-Североземельский; секторы Арктико-Азиатского региона: 5.1 — Хребта Гаккеля, 5.2 — Нансеновский, 5.3 — Амундсеновский, 5.4 — Ломоносовский, 5.5 — Таймыро-Североземельский, 5.6 — Лаптевский, 5.7 — Хараулахский, 5.8 — Западно-Верхоянский, 5.9 — Адыча-Тарынский, 5.10 — Южно-Верхоянский, 5.11 — Прихотский, 5.12 — Куларо-Полоусненский, 5.13 — Черский; секторы Восточно-Арктического региона: 6.1 — Макаровский, 6.2 — Новосибирско-Чукотский; секторы Алтае-Саянского региона: 7.1 — Алтайский, 7.2 — Кузнецко-Тувинский, 7.3 — Восточно-Саянский; секторы Байкало-Станового региона: 8.1 — Байкальский, 8.2 — Забайкальский, 8.3 — Алданский, 8.4 — Становой; секторы Монголо-Охотского региона: 9.1 — Восточно-Забайкальский, 9.2 — Верхнеамурский, 9.3 — Тукурингра-Шантарский, 9.4 — Большехинганский, 9.5 — Сунляю-Зейский; секторы Западно-Тихоокеанского региона: 10.1 — Бурейско-Ханкайский, 10.2 — Сихотэ-Алинский, 10.3 — Хоккайдо-Сахалинский, 10.4 — Охотоморский, 10.5 — Курильский, 10.6 — Камчатский, 10.7 — Корякский, 10.8 — Восточно-Чукотский, 10.9 — Олюторский, 10.10 — Командорский, 10.11 — Северо-Алеутский, 10.12 — Западно-Алеутский, 10.13 — Япономорский, 10.14 — Японский, 10.15 — Зенкевича; секторы Крымско-Кавказского региона: 11.1 — Крымский, 11.2 — Кавказский

Для расчета сейсмической опасности необходимо в первую очередь охарактеризовать каждый домен по величине M_{max} и по параметрам повторяемости землетрясений различных магнитуд в его пределах. Значение M_{max} назначалось с учетом многофакторности связей между особенностями строения и истории развития территории и ее сейсмичностью на основании анализа имеющихся сейсмостатистических данных — как магнитуда максимально сильного (в диапазоне до $M = 5,5 \pm 0,2$) известного в пределах домена землетрясения, округленная до 0,5 в сторону увеличения. Доменам, в пределах которых за период наблюдений землетрясения не регистрировались, присваивалось значение $M_{max} = 3,5$. Если смежные неотектонические домены с близкими классами активности характеризовались одинаковыми значениями M_{max} , они объединялись в более крупные сейсмодомены, особенно в сейсмически малоактивных регионах (рис. 8), что повышало обоснованность построения графиков повторяемости землетрясений за счет более представительной статистики.

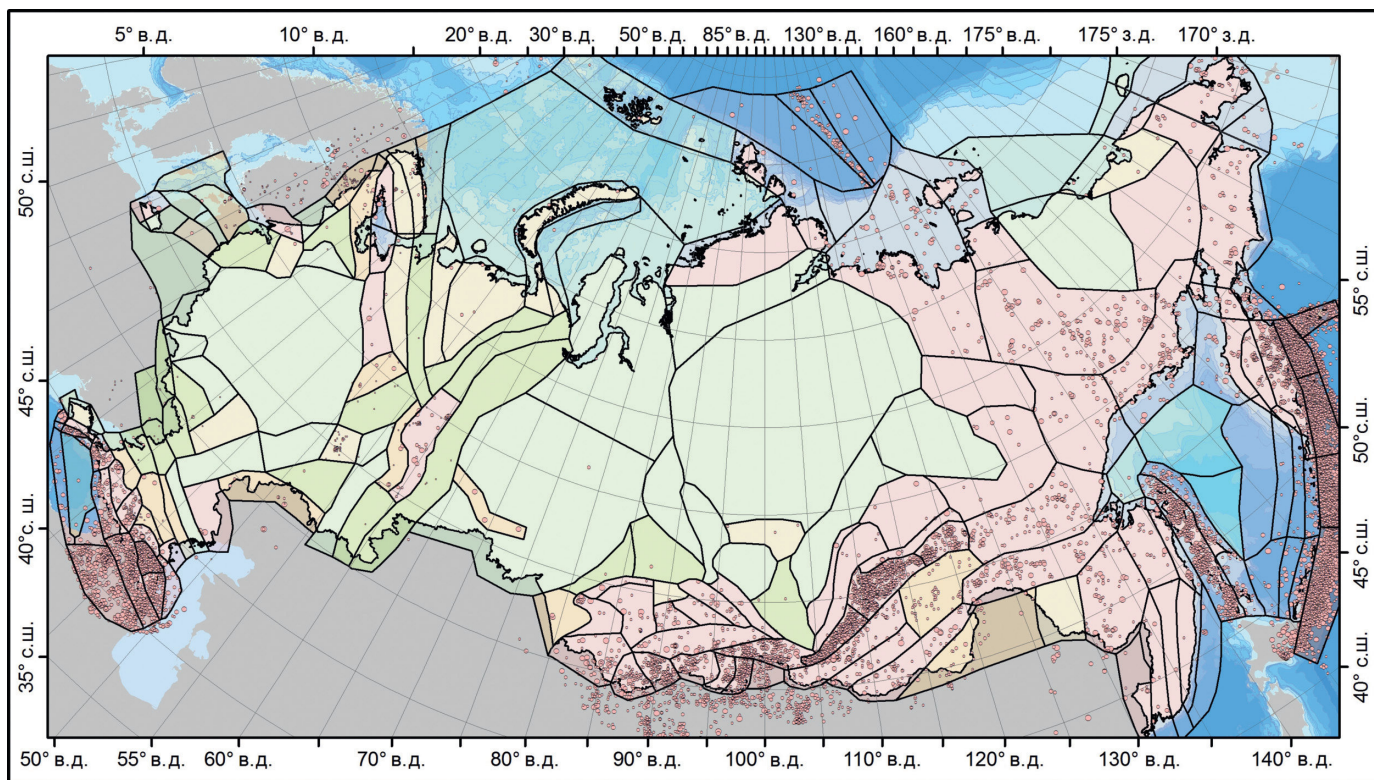


Рис. 8. Доменная модель зон ВОЗ. Нанесены эпицентры землетрясений с $M \leq 5,5$, включенных в СКЗ

По принципу построения графика повторяемости домены можно разделить на три категории. К первой относятся домены, по которым имеется достаточное количество статистических данных для построения графиков повторяемости. Для этих доменов были получены графики повторяемости землетрясений по тем же принципам, что и для региона.

Ко второй категории относятся домены, по которым статистических данных для построения графика повторяемости землетрясений недостаточно. Для них применялся тот же принцип параметризации, что и для линеаментов в пределах региона. Для расположенных рядом доменов строился общий график повторяемости. Полученный график распределялся между доменами по формуле:

$$V_i(M) = S_i \cdot V \Sigma(M) / \Sigma S_{M_{max} \geq M} \quad (2)$$

где $V_i(M)$ — повторяемость землетрясений с магнитудой M в i -м домене; S_i — площадь i -го домена; $V \Sigma(M)$ — повторяемость землетрясений с магнитудой M в общем графике повторяемости для доменов; $\Sigma S_{M_{max} \geq M}$ — сумма площадей доменов с M_{max} большей или равной магнитуде M .

К третьей категории относятся домены, для которых статистические данные по землетрясениям отсутствуют полностью. Для таких доменов значение M_{max} принято равным 3,5 с повторяемостью 1 раз за 100 лет.

2.2.3. Дополнительные параметры зон ВОЗ

Принципиальным отличием ВАСО от детерминистских методов является обязательный учет вероятного разброса значений параметров моделей. Это касается как пространственных параметров зон ВОЗ (рис. 9), так и характеристик модели затухания. Например, углы падения плоскостей линеаментов модели зон ВОЗ для ОСР задаются равными $90 \pm 45^\circ$ (падение в ту или иную сторону), при этом для площадок очагов дополнительно задается диапазон вероятного разброса этих значений $\pm 20^\circ$. Кроме того, задается стандартное отклонение площадки очага от оси линеаментов (σ), зависящее от максимальной возможной магнитуды на данном линеаменте (M_{max}) и магнитуды модельного землетрясения. В модели сейсмического эффекта также предусмотрены случайные поправки к расчетной интенсивности, позволяющие учесть вероятный разброс балльности от тех или иных случайных факторов.

Перечень дополнительных характеристик, задаваемых для каждой зоны ВОЗ при моделировании виртуального каталога землетрясений:

- площадь зоны или длина линейной зоны в тех же единицах, к которым приведен график повторяемости (если закладывается график повторяемости, не нормированный на площадь домена, то этот параметр не используется);
- диапазон глубин (км) для розыгрыша глубины «гипоцентра» при моделировании виртуального каталога землетрясений и диапазон разрешенных глубин для протяженного очага (очага-площадки);
- магнитуда, начиная с которой принимается, что очаг имеет преимущественный азимут простираения; величина этого азимута и вероятный диапазон ее разброса;
- магнитуда, начиная с которой очаг-площадка имеет один или два преимущественных угла наклона; значения этих углов и вероятные диапазоны их разброса.

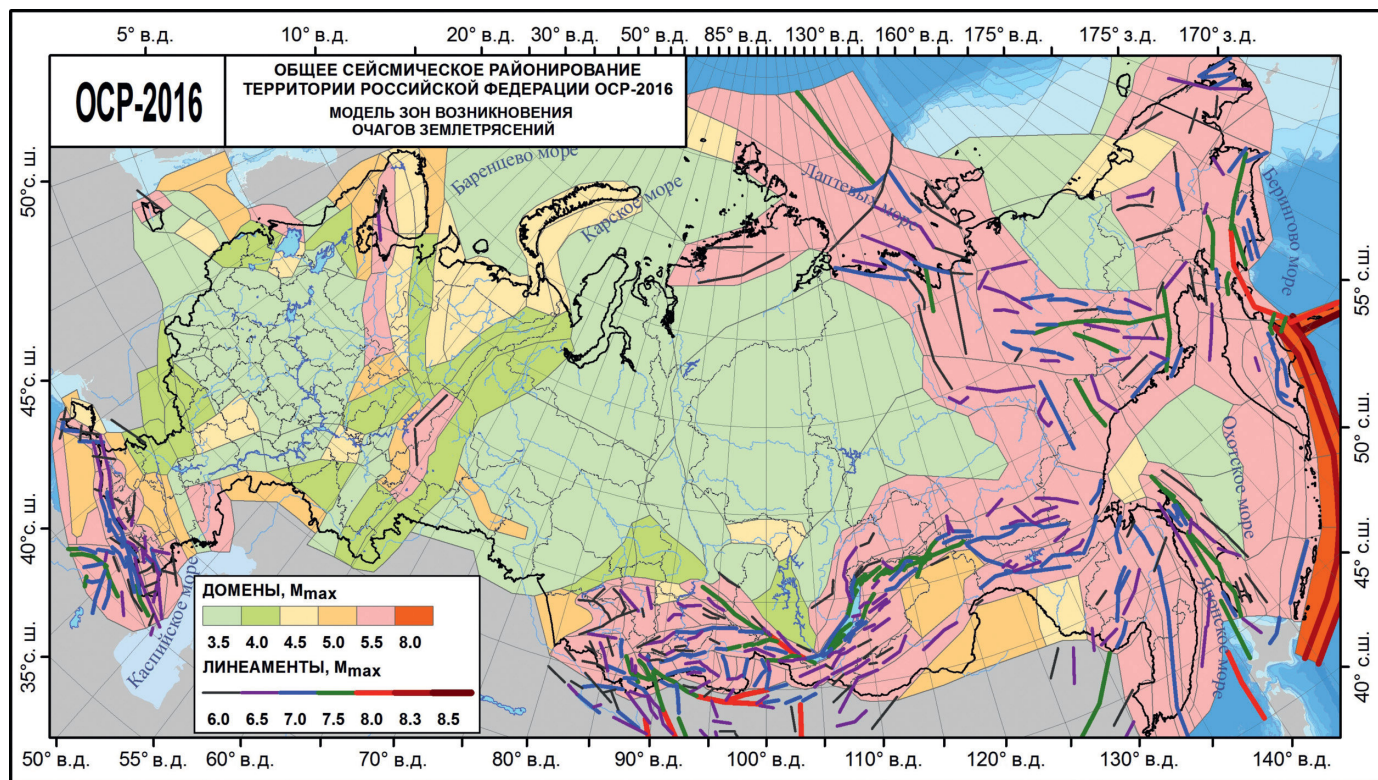


Рис. 9. Модель зон ВОЗ, положенная в основу при разработке карт ОСР-2016