

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ КРЫМА И СЕВЕРНОГО КАВКАЗА И АДАПТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ОЦЕНОК К КОМПЛЕКТУ КАРТ ОСР-2014

ANALYZING THE SEISMIC HAZARDS OF THE CRIMEA AND NORTH
CAUCASUS AND ADAPTING THE OBTAINED ASSESSMENTS
TO THE GSZ-2014 SET OF MAPS

УЛОМОВ В.И.

Главный научный сотрудник Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, д. ф.-м. н., профессор, г. Москва,
ulomov@ifz.ru

БОГДАНОВ М.И.

Генеральный директор Института геотехники и инженерных
изысканий в строительстве (ООО «ИГИИС»), к. г.-м. н.,
г. Москва, mail@igiis.ru

ПУСТОВИТЕНКО Б.Г.

Ведущий научный сотрудник Института сейсмологии
и геодинамики Крымского федерального университета
им. В.И. Вернадского, д. ф.-м. н., г. Симферополь,
bella@seismoexpert.crimea.ua

ПЕРЕТОКИН С.А.

Заведующий лабораторией информационных технологий
геодинамического и экологического мониторинга СКТБ «Наука»
Красноярского научного центра СО РАН, к.т.н., г. Красноярск,
saperetokin@yandex.ru

СТРОМ А.Л.

Главный эксперт отдела оценки сейсмической опасности
Центра службы геодинамических наблюдений
в электроэнергетической отрасли (ЦСГНЭО) —
филиала ОАО «Институт Гидропроект», к. г.-м. н.,
г. Москва, strom.alexandr@yandex.ru

АКАТОВА К.Н.

Старший научный сотрудник Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, akatova@ifz.ru

ДАНИЛОВА Т.И.

Старший научный сотрудник Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, к. г.-м. н., г. Москва, dana-geo@yandex.ru

МЕДВЕДЕВА Н.С.

Старший научный сотрудник Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, medv@ifz.ru

ULOMOV V.I.

Chief researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth
of the RAS, PhD (doctor of science in Physics and Mathematics),
professor, Moscow, ulomov@ifz.ru

BOGDANOV V.I.

General director of the Institute of Geotechnics and Engineering
Surveys in Construction («IGIS» LLC), PhD (candidate of science
in Geology and Mineralogy), Moscow, mail@igiis.ru

PUSTOVITENKO B.G.

Leading researcher of the Seismology and Geodynamics Institute
of Vernadsky Crimean Federal University, DSc (doctor of science
in Physics and Mathematics), Simferopol, bella@seismoexpert.crimea.ua

PERETOKIN S.A.

Head of the Geodynamic and Ecological Monitoring Information
Technologies Laboratory of the «Наука» Special Design-Engineering
Bureau of the Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS, PhD
(candidate of science in Technics), Krasnoyarsk, saperetokin@yandex.ru

STROM A.L.

Chief expert of the Seismic Hazard Assessment Department
of the Geodynamics Research Center – a branch
of the «Institute Hydroproject» OJSC, PhD (candidate of science
in Geology and Mineralogy), Moscow, strom.alexandr@yandex.ru

AKATOVA K.N.

Senior researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth
of the RAS, PhD (candidate of science in Physics and Mathematics),
Moscow, akatova@ifz.ru

DANILOVA T.I.

Senior researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth
of the RAS, PhD (candidate of science in Physics and Mathematics),
Moscow, dana-geo@yandex.ru

MEDVEDEVA N.S.

Senior researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth
of the RAS, Moscow, medv@ifz.ru

Ключевые слова: землетрясение; сейсмогеодинамика; сейсмическая опасность; общее сейсмическое районирование; Крым; Северный Кавказ; карты ОСР-2014.

Аннотация: статья является продолжением работ по совершенствованию общего сейсмического районирования (ОСР) территории Российской Федерации. Особое внимание уделено оценке сейсмической опасности Крыма и Северного Кавказа и адаптации полученных результатов к комплексу карт ОСР-2014. Разработанные новые подходы к зонированию позволили оценить степень сейсмической опасности Крымско-Северокавказского региона и выделить в нем зоны с различной интенсивностью землетрясений для нормативных периодов повторяемости 500, 1000 и 5000 лет более объективно.

Key words: earthquake; seismic geodynamics; seismic hazard; general seismic zonation; Crimea; North Caucasus; GSZ-2014 (OSR-2014) set of maps.

Abstract this article is a continuation of papers on improving the general seismic zonation (GSZ) of the Russian Federation territory. Particular attention is paid to assessing seismic hazards of the Crimea and North Caucasus and adapting the obtained results to the GSZ-2014 (OSR-2014) set of maps. The developed new approaches to the zonation technology made it possible to assess the seismic hazard degree of the Crimean-North-Caucasian region and to single out its zones with various earthquake intensities for the normative repeatability periods of 500, 1000 and 5000 years more objectively.

Введение

Настоящая статья является продолжением работ по совершенствованию общего сейсмического районирования (ОСР) территории Российской Федерации [19, 21, 25, 26]. Особое внимание уделено исследованиям сейсмогеодинамики Крыма и Северного Кавказа с целью оценки их сейсмической опасности и адаптации полученных результатов к комплексу карт ОСР-2014.

Следует заметить, что при создании карт ОСР-97 [27] Крымско-Кавказско-Копетдагский регион, к которому принадлежат Северный Кавказ и Крым, рассматривался как единая сейсмогенерирующая линейная область, характеризующаяся пространственно-временной упорядоченностью сейсмогеодинамического развития [23, 24]. Общая протяженность этого региона — около 3000 км, что сопоставимо с большинством других сейсмоактивных регионов Земли [22, 23].

До этого при создании карт ОСР-78 (и предшествующих им) территории бывшего СССР сейсмичность Крыма, Кавказа и Копетдага рассматривалась изолированно. При этом большее внимание уделялось Кавказу, который традиционно служил тестовым полигоном для разработки методики сейсмического районирования [1].

При выполнении в 1991–1997 гг. исследований по ОСР-97 и в ходе работ 1992–1999 гг. по крупнейшей международной программе по оценке глобальной сейсмической опасности (GSHAP) границы Кавказского тестового полигона существенно расширились, охватив сейсмоактивные территории Крыма, Копетдага, Турции и Ирана. Научное руководство работой на этом тестовом полигоне, как и на всей территории Северной Евразии, осуществлял Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, являвшийся одним из девяти мировых региональных центров по выполнению программы GSHAP для региона 7 (научный координатор — В.И. Уломов) [28, 31, 32]. В этих исследованиях принимали участие институты бывших республик СССР, а также зарубежные ученые. Им способствовали совещания и международные конференции в Москве (1993 г.), Ашхабаде (1994 г.), Ереване (1996 г.), Тбилиси (1997 г.), а также за пределами стран СНГ.

Нормативные карты общего сейсмического районирования, составленные по единообразной методике, разработанной в ходе этих исследований, охватили территорию как Российской Фе-

дерации (ОСР-97), так и других стран СНГ, в том числе Украины (ОСР-98, ОСР-2004) [10, 11]. В 2014 году соответствующие их части практически без изменений вошли в состав современных национальных нормативных документов Украины, опубликованных на украинском языке (ДБН В.1.1-12:2014).

Фрагменты карт ОСР территории Республики Крым и города Севастополь, которые в марте 2014 г. официально стали субъектами Российской Федерации, были еще раз пересмотрены и после согласования с ГАУ «Крымский экспертный совет по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений» (г. Симферополь) вошли в состав комплекта карт ОСР-2014 России.

Основные аспекты методологии исследований

Вероятностный анализ сейсмической опасности

Оценка сейсмической опасности на исследуемой территории является главной целью сейсмического районирования.

Сейсмическая опасность (СО) — это ожидаемые максимальные сейсмические воздействия на заданной площади, превышение которых возможно с определенной вероятностью в течение заданного интервала времени. Сейсмические воздействия выражаются в баллах шкалы сейсмической интенсивности, а также в физических параметрах колебаний (ускорения, скорости и др.), используемых при проектировании зданий и сооружений. Вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО), учитывающий случайные неопределенности, которые неизбежно возникают при оценке величины прогнозируемого сейсмического воздействия, в последние полвека применяется в большинстве стран мира.

Вместе с тем российская модификация ВАСО имеет целый ряд отличий от зарубежной. Главными отличиями и преимуществами методов определения сейсмической опасности, впервые предложенных и реализованных на практике при разработке карт ОСР-97, являются в том числе следующие их особенности:

- учет разнообразной информации о сейсмичности (структурирование поля сейсмичности, нелинейность графиков повторяемости землетрясений и создаваемого ими сейсмического эффекта) и об очагах земле-

трясений (учет размера, ориентировки, сброшенного упругого напряжения и пр.) [2, 17, 20];

- применение теоретически обоснованного описания поля некогерентного излучения в окрестности протяженного очага, позволяющее решать проблему завышения балльности при малых эпицентральных расстояниях и автоматически моделировать эллиптичность изосейст от очагов землетрясений больших магнитуд в ближней зоне [2];
- использование разработанного комплекта вероятностных карт, а не одной детерминистской карты, как практиковалось прежде, что позволяет получить вероятностную оценку сейсмической опасности на заданной территории и обеспечить одинаковую степень риска в пределах территорий с определенным периодом повторяемости сейсмических воздействий [3, 17].

Современный вероятностный анализ сейсмической опасности является основой для всех расчетов и построений при выполнении работ по сейсмическому районированию. Он позволяет оценивать степень сейсмического риска, который всегда будет иметь место в реальных природных условиях, и определять его приемлемые (допустимые) уровни при строительстве объектов различных категорий ответственности и с разными сроками службы.

Неполнота знаний и условия неопределенностей, которые в природе всегда существуют, делают неправомерным чисто детерминистский подход к сейсмическому районированию. Иными словами, риск всегда будет иметь место, но его необходимо свести к минимуму. Это и было заложено в картах ОСР-97 и в новом комплекте карт ОСР-2014, позволяющих оценивать степень сейсмической опасности для объектов разных категорий ответственности и с разными сроками службы на трех уровнях (А, В, С), отражающих расчетные интенсивности сейсмических воздействий, с заданной вероятностью ожидаемых на заданной площадке в течение определенного интервала времени.

Таким образом, современные карты ОСР, по определению А.А. Гусева, являвшегося основным разработчиком российской модификации ВАСО, отображают сейсмическую опасность в виде нормативной интенсивности землетрясений, которая вычисляется для каждой точки карты (фактически, площадки, размеры которой определяют-

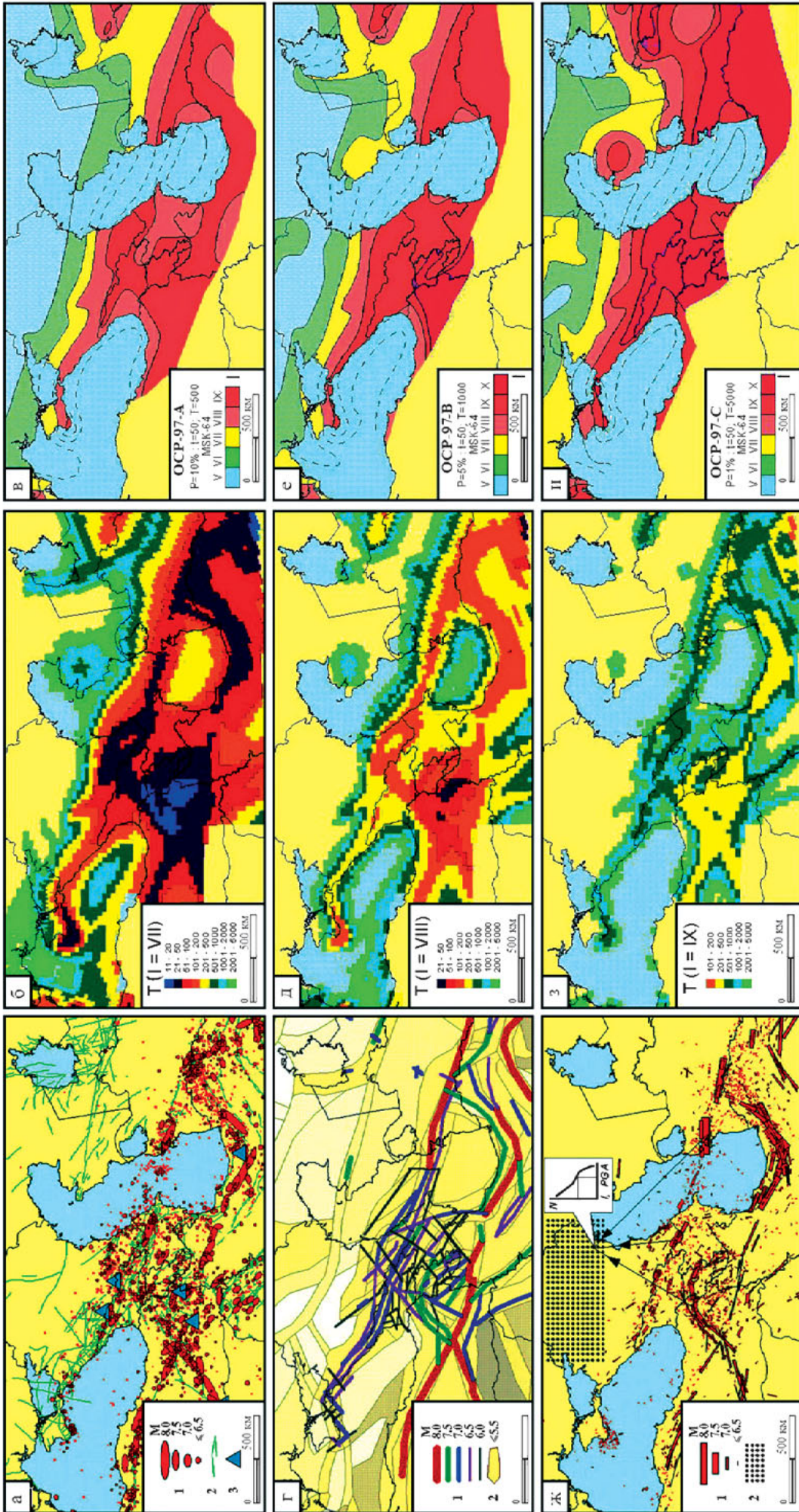


Рис. 1. Технология построения карт ОСР-97, примененная и при создании комплекта карт ОСР-2014: а — карта с данными о региональной сейсмичности, активных разломах и других геолого-геофизических особенностях территории (1 — очаги землетрясений разных магнитуд M ; 2 — разрывные нарушения, в том числе в фундаменте; 3 — крупнейшие вулканы); б — линейно-фрагментно-доменно-фокальная модель зон возникновения очагов землетрясений (1 — сейсмолинеaments; 2 — сейсодомены); ж — виртуальные очаги землетрясений реалистичной протяженности и ориентации и рассчитанные сейсмические эффекты от каждого из этих очагов для каждой регулярной сетки (1 — очаги; 2 — узлы сетки); на врезке в правой верхней части показан вид графика, построенного для каждой расчетной точки и отражающего количество N сейсмических воздействий с заданной интенсивностью I или в каждом из узлов регулярной сетки; в, е, и — соответственно итоговые карты сейсмического районирования ОСР-97-А, -В, -С для нормативных периодов повторности сейсмических воздействий $T = 500; 1000; 5000$ лет с вероятностью $P = 10; 5; 1\%$ возможного превышения указанного сейсмического эффекта в любой точке карты в течение 50-летнего интервала времени t

ся шагом между расчетными точками) как обратная функция повторяемости сотрясений [2, 3]. Концепцию линейно-доменно-фокальной (ЛДФ) модели зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) и ее сейсмологической параметризации разработал и предложил для общего сейсмического районирования В.И. Уломов [17, 18, 20]. Тогда же впервые в качестве источников землетрясений стали рассматриваться не точечные, как прежде, а протяженные очаги землетрясений, частота возникновения которых стала описываться нелинейными графиками повторяемости [15].

Технология прогноза сейсмичности и сейсмической опасности

Представляется полезным напомнить процедуру построения вероятностных карт ОСР-97, которая была применена ко всем выполненным авторами исследованиям по общему сейсмическому районированию и иллюстрируется здесь на примере Ирано-Кавказско-Анатолийского региона, включающего рассматриваемые в этой статье территории Северного Кавказа и Крыма (рис. 1).

Поскольку, как уже было сказано выше, изучение сейсмогеодинамики и сейсмичности и сейсмическое районирование Крыма и Северного Кавказа осуществлялись в 1991–1997 гг. совместно российскими и украинскими сейсмологами, какой-либо существенной корректировки моделей зон ВОЗ не потребовалось. Некоторые изменения коснулись лишь пополнения каталогов землетрясений сейсмическими событиями, произошедшими за последние десятилетия и впервые выявленными по историческим и палео-

сейсмогеологическим данным, и уточнения региональных характеристик затухания сейсмического эффекта с расстоянием и в зависимости от магнитуды землетрясения.

Как показывает рис. 1, на основе данных о региональной сейсмичности, активных разломах и других геолого-геофизических данных (а) создается ЛДФ-модель зон ВОЗ (з), представленная в виде трех основных структурных элементов — сейсмолинеаментов (з, 1), сейсмодоменов (з, 2) и потенциальных очагов землетрясений различных магнитуд. Затем на основе реального каталога землетрясений и параметризованной ЛДФ-модели синтезируется модельный каталог, продленный на достаточно протяженный интервал времени (десятки и сотни тысяч лет). После этого в компьютере «разыгрываются» виртуальные очаги землетрясений реалистичной протяженности и ориентации (ж, 1). Сейсмический эффект от каждого из этих очагов рассчитывается для каждого узла регулярной сетки (ж, 2), сплошь покрывающей исследуемую территорию, представленную в цифровом виде. Получаемые в результате этих расчетов карты периодов повторяемости сейсмического эффекта (T , лет) в баллах шкалы сейсмической интенсивности (I) в каждом из узлов регулярной сетки изображены в центральном столбце рис. 1 (б, д, з). Последний справа столбец рис. 1 (в, е, и) демонстрирует итоговые карты сейсмического районирования ОСР-97 рассматриваемой территории для нормативных периодов повторяемости сейсмических воздействий 500, 1000, 5000 лет (карты А, В, С соответственно) с соответствующей вероятностью P (10, 5, 1% соответ-

ственно) возможного превышения указанного сейсмического эффекта в любой точке карты в течение 50-летнего интервала времени.

Рисунок 2 иллюстрирует основные структурные элементы ЛДФ-модели зон ВОЗ и методологию их сейсмологической параметризации, детально описанную в работах [17, 27]. На рисунке 2, а приведены типичные графики среднегодовой скорости потока сейсмических событий во всем регионе (V_R) и в составляющих его структурных элементах — линейных (V_L), доменах (V_d) и потенциальных очагах землетрясений (V_f). Видны интервалы магнитуд, свойственные каждому типу структур. Рисунок 2, б поясняет технологию сейсмологической параметризации основных структур модели зон ВОЗ, также детально описанную в работе [17] и во многих других публикациях.

Чтобы дать представление о конфигурации исследуемого в данной статье сейсмогеодинамического региона (региона 1.1.1) и его местоположении в составе территории Российской Федерации, на рис. 3 приведена актуализированная схема общей сейсмической регионализации Северной Евразии, из которой заимствованы нумерация и наименование регионов и субрегионов.

О принципах идентификации и параметризации очаговых зон

Сейсмическая опасность определяется не только сильными и сильнейшими землетрясениями с магнитудами $M \geq 6,0 \pm 0,2$, очаги которых приурочены к крупным активным разломам, достаточно уверенно выделяемым и аппроксимируемым (на относительно мелко-масштабном уровне ОСР) по сейсмо-

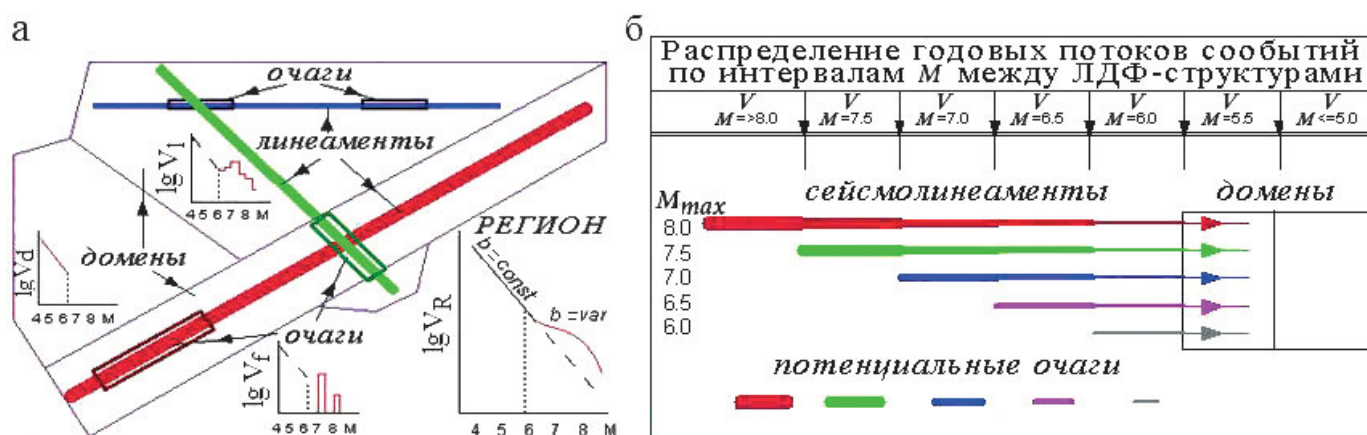


Рис. 2. Основные структурные элементы ЛДФ-модели зон ВОЗ: а — типичные графики среднегодовой скорости потока сейсмических событий во всем регионе (V_R) и в составляющих его линейных (V_L), доменах (V_d) и потенциальных очагах землетрясений (V_f); б — схема, поясняющая технологию сейсмологической параметризации основных структур модели зон ВОЗ

линеаментам. Определенную опасность для строительных объектов могут создавать в своей эпицентральной области и очаги умеренных по магнитуде землетрясений ($M \leq 5,5 \pm 0,2$), отне-

сенные в ЛДФ-модели к доменной структуре зон ВОЗ. Эти очаги также приурочены к активным разломам и иным неоднородностям в земной коре, но их линейные размеры слишком ма-

лы (обычно менее 5 км), чтобы быть надежно идентифицированными. Поэтому при проведении сейсмического районирования таких территорий принята модель рассеянной сейсмично-

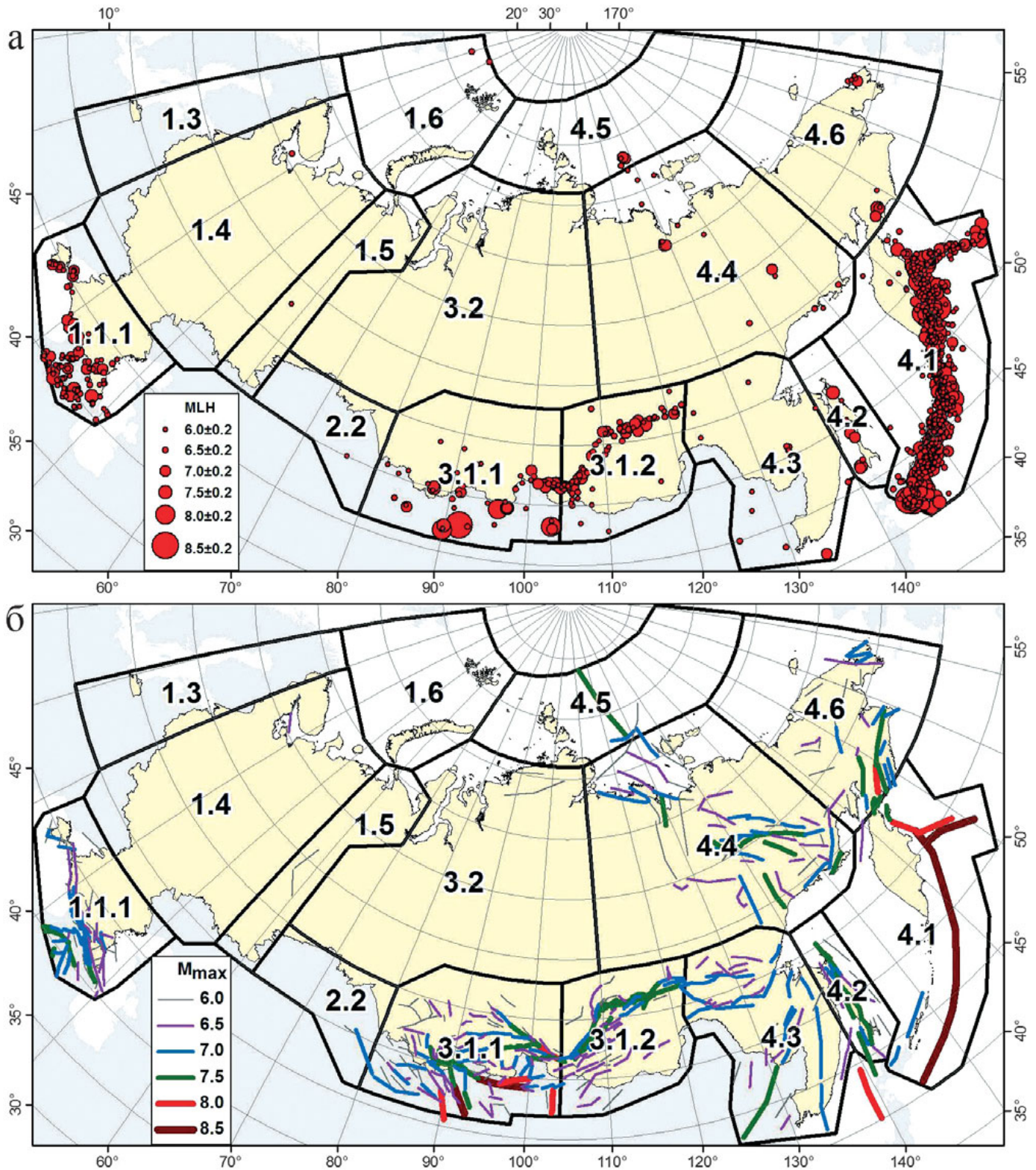


Рис. 3. Результаты актуализированной сейсмогеодинамической регионализации территории России на основе регионализации Северной Евразии: а — карта с нанесенными эпицентрами всех известных землетрясений с магнитудами $MLH \geq 6,0 \pm 0,2$; б — соответствующая линеamentная модель зон ВОЗ (M_{max} — максимальная возможная магнитуда, соответствующая MLH). Регионы: 1.1.1 — 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 — Чукотский (регионы 1.2 и 2.1 находятся за пределами территории РФ, поэтому не указаны)

сти, согласно которой очаги землетрясений возникают случайным образом в пределах некоторых блоков земной коры (литосферы), рассматриваемых как площадные (объемные) зоны ВОЗ — сейсмодомены.

В отличие от сейсмолинеаментов (активных разломов), принципы выделения которых многократно описаны в литературе и в достаточной степени формализованы [15, 18, 20 и др.], критерии выделения доменов как сейсмогенерирующих структур в определенной мере остаются субъективными. Вместе с тем при небольшой глубине залегания очага локальный сейсмический эффект от него будет существенным. Примером может служить Ташкентское землетрясение 1966 года с магнитудой $M=5,2$, при котором интенсивность сотрясений в центральной части столицы Узбекистана достигала 8 баллов по шкале MSK-64, а уже на окраинах города едва превышала 5 баллов [15].

Более того, на слабоактивных территориях могут быть расположены и потенциальные очаги редких, но очень крупных землетрясений, не подчиняющиеся региональному сейсмическому режиму. Классическим примером таких «индивидуальных» сейсмических событий являются три 9–10-балльных Газлийских землетрясения с магнитудами 7,0; 7,3 и 7,2, возникшие в 1976 и 1984 гг. в 5-балльной (по действовавшей тогда карте ОСР-68) зоне Бухарской области Узбекистана в центре Туранской литосферной плиты [22].

Перечень факторов, которые могут влиять на возникновение землетрясений на слабоактивных территориях, весьма широк и определяется как геодинамической, геолого-геоморфологической, геофизической и сейсмологической изученностью территории, так и индивидуальными взглядами исследователей. В связи с существующими неопределенностями в интерпретации исходных данных для территорий слабой и умеренной сейсмичности ниже рассмотрены основные принципы выделения и параметризации доменной структуры зон ВОЗ при построении карт сейсмического районирования ОСР-97, ОСР-2012 и ОСР-2014 (рис. 4).

Технология параметризации сейсмолинеаментов для построения карт ОСР-97 [27] и последующих карт ОСР-2012 и ОСР-2014 не менялась, поэтому здесь описываться не будет. Можно лишь напомнить, что повто-

ряемость землетрясений с заданной магнитудой вдоль линеаментов определяется как произведение длины линеамента на региональную повторяемость, нормированную по отношению к суммарной длине линеаментов региона, способных генерировать землетрясения с рассматриваемой магнитудой [27].

Доменная структура зон ВОЗ по ОСР-97

При составлении карт ОСР-97 рассматривались две конструкции модели зон возникновения очагов землетрясений — исключительно доменная (ответственные исполнители — В.Г. Трифонов и Н.В. Шебалин) и линеаментно-доменная (ответственные исполнители — В.И. Уломов и В.Г. Трифонов). Вторая модель зон ВОЗ, дополненная потенциальными очагами (фокусами) землетрясений, получившая название ЛДФ-модели, была принята за основу при создании карт ОСР-97 и для международной программы GSHAP для территории Северной Евразии [32]. При этом геометрия доменов была принята по работе [29], а их максимальная магнитуда $M_{max}=5,5\pm 0,2$ оценивалась в соответствии с концепцией ЛДФ-модели зон ВОЗ [27].

Доменная структура зон ВОЗ по ОСР-2012

При составлении карт ОСР-2012 за основу была принята модель тектонического и неотектонического районирования, разработанная под руководством Г.С. Гусева [4, 5, 6]. В этой модели домены рассматриваются как пространственно локализованные целостные объекты с многофакторным взаимодействием их 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, скорость вертикального и горизонтального перемещения земной поверхности), 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.

Для расчета сейсмической опасности, как и во всех предыдущих вариантах зон ВОЗ, домены классифицируются по величине M_{max} и по параметрам, характеризующим повторяемость землетрясений различных магнитуд в пределах конкретного домена. Учитывая многофакторность связей между особенностями строения и истории развития территории и ее сейсмичностью, значения M_{max} для доменов назначались на основании анализа имеющейся сейсмостатистики — как магнитуда максимального (в диапазоне до $M=5,5\pm 0,2$) наблюдаемого землетрясения, известного в пределах домена, округленная до 0,5 единиц магнитуды в сторону увеличения. Доменам соответствующего класса геодинамической активности, в пределах которых за период наблюдений землетрясения не регистрировались, присваивалось значение $M_{max}=3,5$ при периоде повторяемости 100 лет. Если смежные неотектонические домены с близкими классами активности характеризовались одинаковыми значениями M_{max} , они объединялись в более крупные сейсмические домены, особенно в сейсмически малоактивных регионах, что повышало обоснованность построения графиков повторяемости землетрясений за счет более или менее представительной статистики.

Доменная структура зон ВОЗ по ОСР-2014

Исследования по совершенствованию карт ОСР-2014 привели к необходимости модификации приемов выделения доменов и их сейсмологической параметризации [9].

Территория с умеренной и слабой сейсмической активностью разбивалась на домены с учетом информации о тектонике в соответствии с работами [4, 21]. Смежные домены с близкими характеристиками активности объединялись в более крупные домены. Максимальная возможная магнитуда M_{max} каждого домена определялась следующим образом. Если в его пределах располагался линеамент или часть линеамента, его M_{max} принималась равной $5,5\pm 0,2$. В противном случае M_{max} домена оценивалась как максимально наблюдаемая магнитуда, увеличенная на 0,5 единицы, но не выше 5,5.

По принципу построения графиков повторяемости домены в предложенной модификации можно разделить на три категории.

К первой категории относятся домены, по которым имеется достаточная

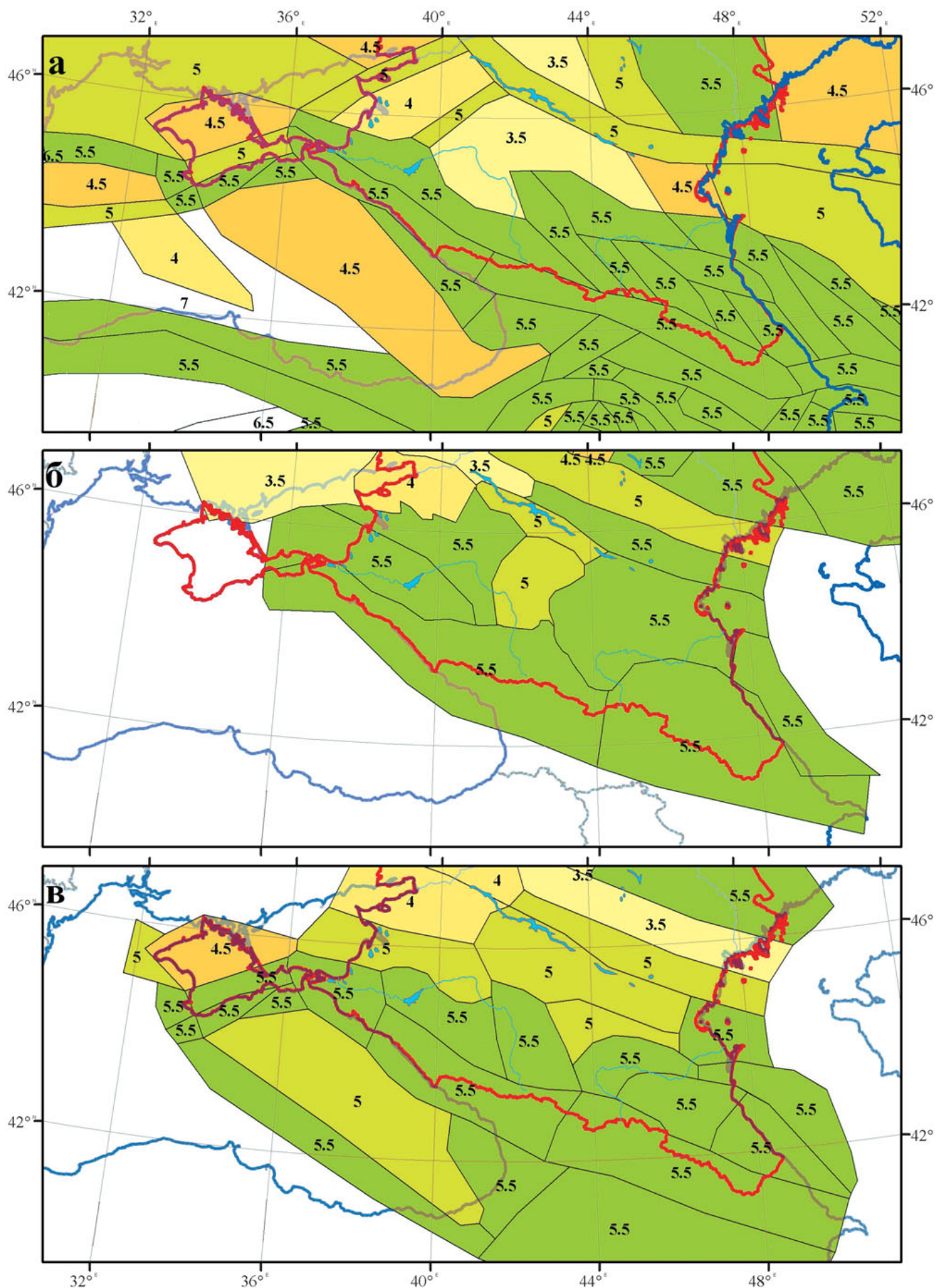


Рис. 4. Доменная структура зон ВОЗ Крымско-Северокавказского региона по ОСР-97 (а), ОСР-2012 (б) и ОСР-2014 (в). Чёрные тонкие линии — границы между доменами. Цифрами внутри каждого домена указано соответствующее значение M_{max} . Красная линия — государственная граница Российской Федерации

статистика сейсмических событий для построения графиков повторяемости. Для них эти графики были получены по тем же принципам, что и для всего рассматриваемого региона Крыма и Северного Кавказа (региона 1.1.1).

Ко второй категории относятся домены, по которым статистики недостаточно для построения графиков повторяемости землетрясений. Для них применялся принцип параметризации, используемый в ЛДФ-модели зон ВОЗ при параметризации сейсмолинементов в пределах квазиоднородного в сейсмогеодинамическом отношении региона, т.е. распределение потоков сейсмических событий осуществлялось пропорционально площадям доменов.

К третьей категории относятся домены, по которым статистика о землетрясениях отсутствует полностью. Для них магнитуа M_{max} принималась равной $3,5 \pm 0,2$ с повторяемостью 100 лет. В подобных случаях для коэффициента наклона графиков повторяемости землетрясений b задавалось среднее значение для региона минус 0,95.

Процедуру построения корректно параметризованной ЛДФ-модели зон ВОЗ можно представить в виде следующих этапов.

1. Сейсмогеодинамическая регионализация. Выполнение корректировки сейсмогеодинамической регионализации Северной Евразии для территории РФ в рамках ОСР-2014.

2. Выделение в пределах регионов линементных структур, способных генерировать землетрясения с магнитудой $MLH \geq 5,8$. Определение координат линементов, их длин, углов падения плоскостей разрывов, соответствующих сейсмолинеаментам, M_{max} и других параметров.

3. Построение региональных графиков повторяемости землетрясений на основе поагнитудного анализа каталога землетрясений, выделения представительных периодов регистрации землетрясений с шагом по магнитуде 0,5 и пр.

4. Распределение региональной повторяемости землетрясений между линеаментами региона с учетом их длины и величины M_{max} .

5. Выделение доменов как площадных зон ВОЗ с $M_{max} < 5,8$ с использованием набора методов, комбинируемых в зависимости от распределения сейсмичности в регионе и полноты исходных данных.

6. Параметризация доменов. Определение координат вершин доменов, их

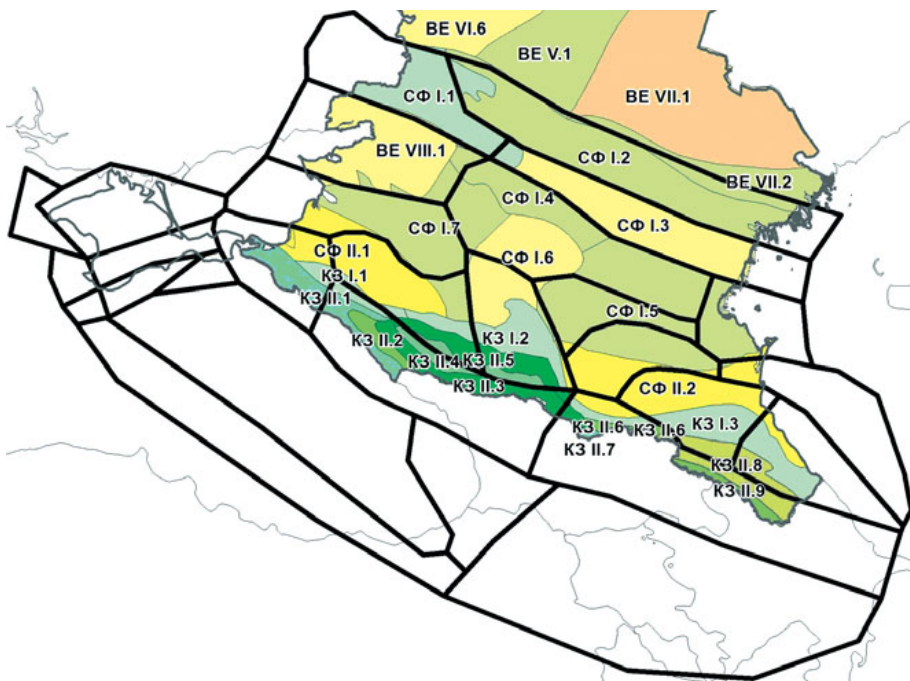


Рис. 5. Сравнение доменной структуры зон ВОЗ для ОСР-2014, модифицированной С.А. Перетокиным (границы доменов показаны жирными линиями), и для ОСР-2012, разработанной Г.С. Гусевым (домены окрашены и пронумерованы с учетом их тектонической принадлежности: КЗ — Большой Кавказ, СФ — Скифская плита, ВЕ — Восточно-Европейская платформа)

площади, мощности сейсмогенерирующего слоя, M_{max} и др.

7. Построение для доменов графиков повторяемости землетрясений в интервале магнитуд 3,3–5,7 с шагом 0,5 с использованием процедуры, одинаковой для доменов, по которым достаточно статистической информации, и для построения региональных графиков, но с применением дополнительных ме-

тодов для доменов с умеренной и слабой сейсмичностью.

8. Проверка корректности модели зон ВОЗ с помощью синтезирования на ее основе модельного каталога землетрясений средствами ВАСО и сравнения построенных по нему среднегодовых графиков повторяемости с графиками, построенными по исходному каталогу региона (они должны совпадать

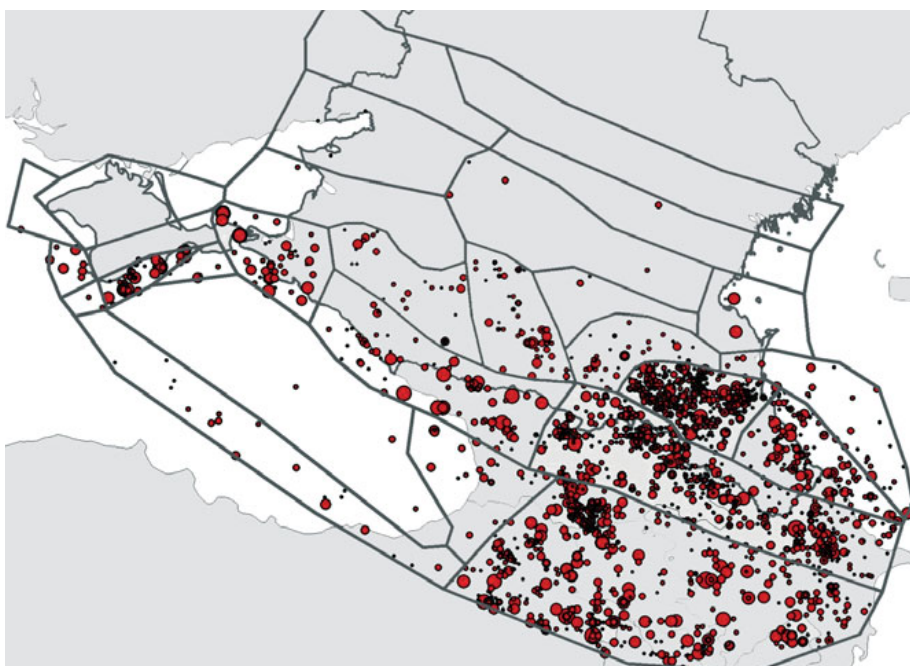


Рис. 6. Распределение эпицентров всех известных землетрясений разных магнитуд (по «Специализированному каталогу землетрясений» — СКЗ) в пределах доменов, модифицированных для ОСР-2014

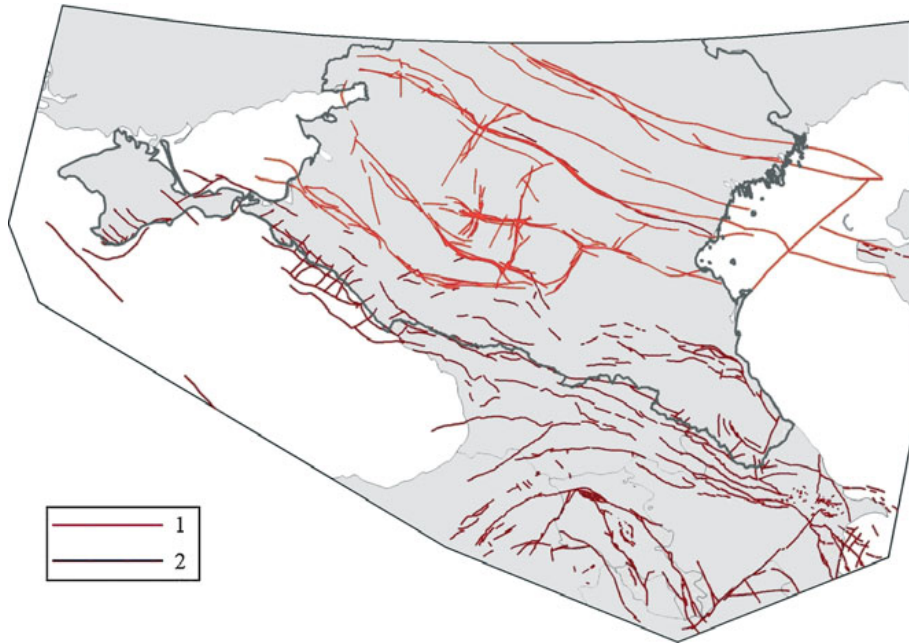


Рис. 7. Система активных разломов в регионе 1.1.1, выявленных на основе обобщений разных данных, выполненных: 1 — О.Н. Круткиной и В.В. Снежко (ВСЕГЕИ); 2 — В.Г. Трифоновым и А.И. Кожуриным (ГИН РАН)

во всем интервале магнитуд, распределение поля модельной сейсмичности должно соответствовать реальной сейсмичности).

На рисунке 5 приведено сравнение доменной структуры зон ВОЗ для ОСР-2014, модифицированной С.А. Петрокиным, и для ОСР-2012, разрабо-

танной Г.С. Гусевым. Как видно, новая модель охватывает большую площадь сейсмоактивной территории, включая Крым и часть сопредельных зарубежных районов. В целом же наблюдается определенная согласованность в конфигурациях доменов.

Полученное разбиение региона 1.1.1 на модифицированные домены хорошо согласуется с его сейсмичностью (рис. 6) и в определенной мере с системой выявленных в нем активных разломов разного ранга (рис. 7). Многие из них были приняты во внимание при создании ЛДФ-модели этого региона.

Оценка сейсмической опасности территории Крыма и Северного Кавказа

Сейсмичность рассматриваемого региона проиллюстрирована на рис. 8 и 9. На графиках накопления числа сейсмических событий с шагом 0,5 единиц магнитуды (рис. 9) по оси ординат отложена шкала времени (годы), по оси абсцисс — порядковые номера в последовательности землетрясений соответствующих магнитуд. Синим цветом выделены интервалы времени (годы), принятые для оценки повторяемости

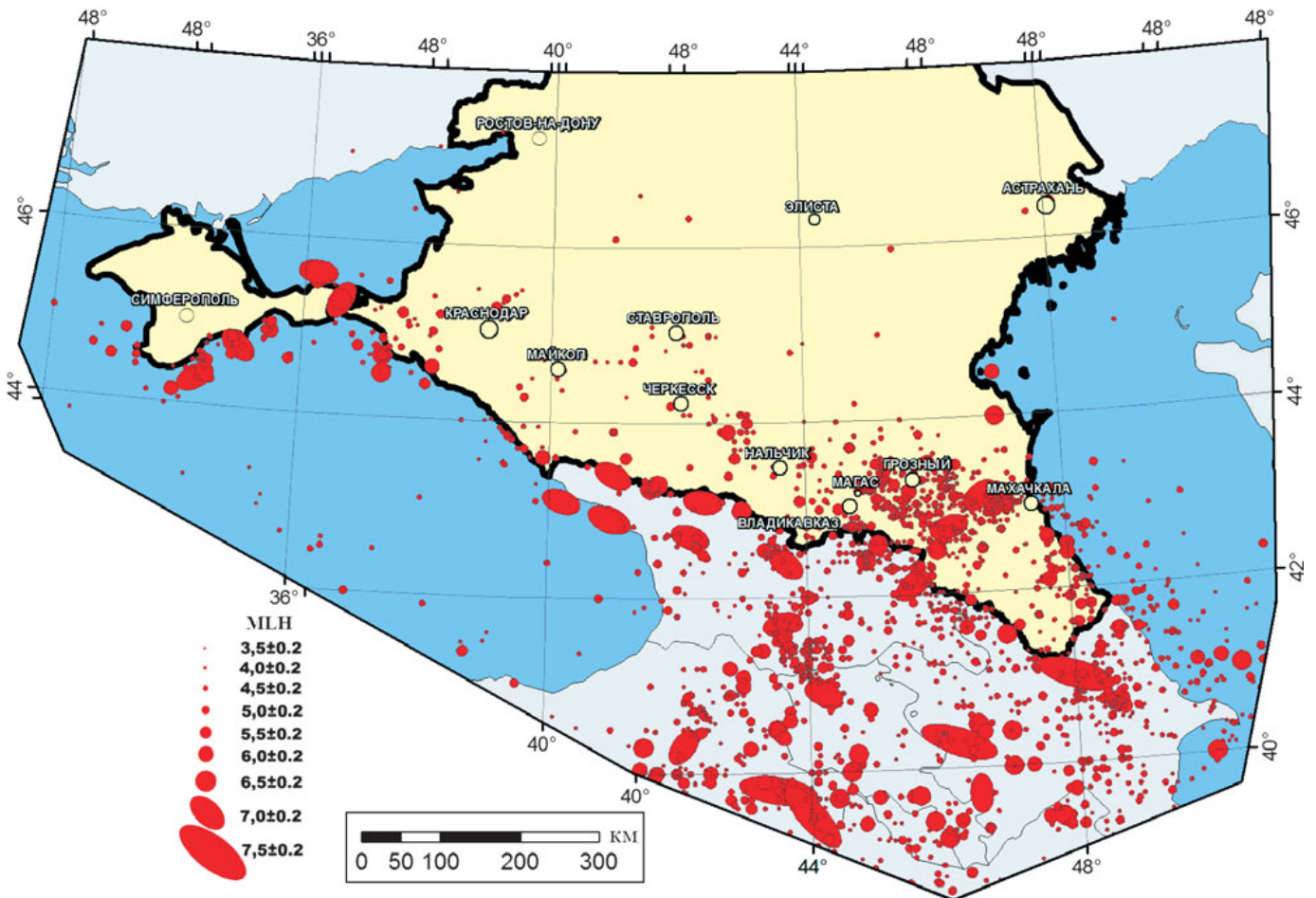


Рис. 8. Сейсмичность Крымско-Северокавказского региона по данным «Специализированного каталога землетрясений» (СКЗ)

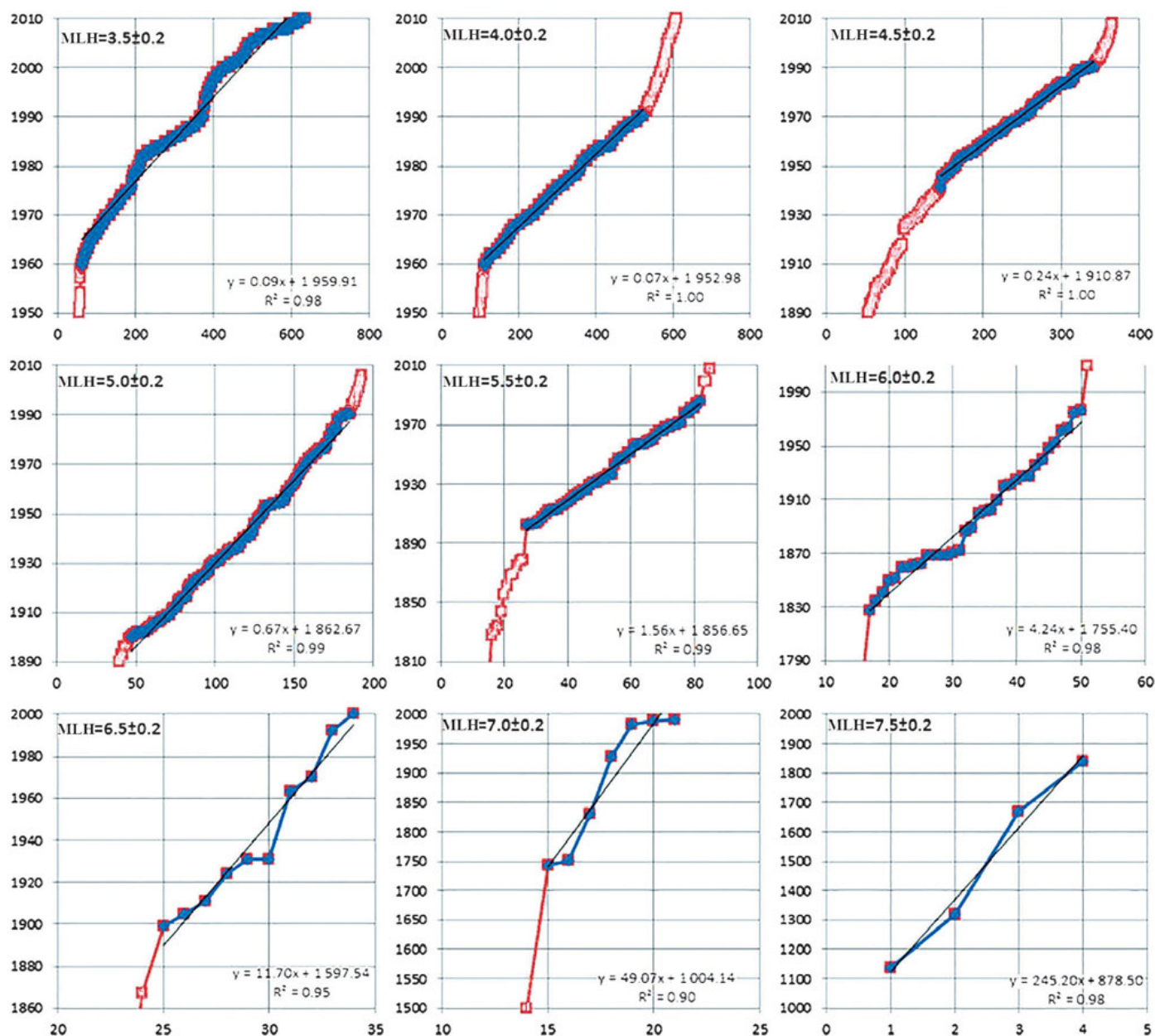


Рис. 9. Графики накопления числа землетрясений разных магнитуд MLH в регионе 1.1.1. Оси ординат (y) — время, гг.; оси абсцисс (x) — кумулятивное число землетрясений; R^2 — коэффициент детерминации

землетрясений и характеризующиеся повышенной частотой их возникновения и относительной стационарностью сейсмического режима. На рисунке 10 приведен график повторяемости землетрясений разных магнитуд в рассматриваемом регионе, характеризующийся идеальным углом наклона (коэффициентом наклона $b=1,0$) и высокой степенью корреляции (коэффициентом детерминации $R^2=1,0$), выявившей недостаточную представительность событий с магнитудой $M \leq 4,0 \pm 0,2$ и несколько более частое возникновение землетрясений в интервале магнитуд 5,5–7,0.

На рисунке 11 показаны сейсмические линеаменты с разными максимальными магнитудами M_{max} в регионе 1.1.1 и проекции на земную поверх-

ность их плоскостей, являющихся источниками землетрясений соответствующих магнитуд M в интервале $(6,0 \pm 0,2) \leq M \leq M_{max}$. Модель сейсмолинеаментов при разработке карт ОСР-2012 не изменялась по сравнению с ОСР-97, а при создании карт ОСР-2014 для этого региона был добавлен Северо-Азовский линеамент с $M_{max}=6,0 \pm 0,2$ восток-северо-восточного простирания протяженностью более 250 км [7, 8].

На основе актуализированной ЛДФ-модели зон ВОЗ региона 1.1.1 был создан модельный каталог виртуальных землетрясений, положенный в основу при разработке комплекта карт ОСР-2014 для стандартных (нормативных) периодов повторяемости сейсмических событий 500, 1000 и 5000 лет. На рисунке 12 сопоставлены распределение

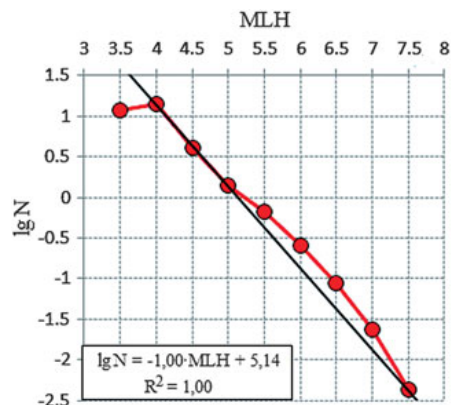


Рис. 10. График повторяемости землетрясений с различной магнитудой MLH в регионе 1.1.1 в полулогарифмическом масштабе (N — число землетрясений; R^2 — коэффициент детерминации)

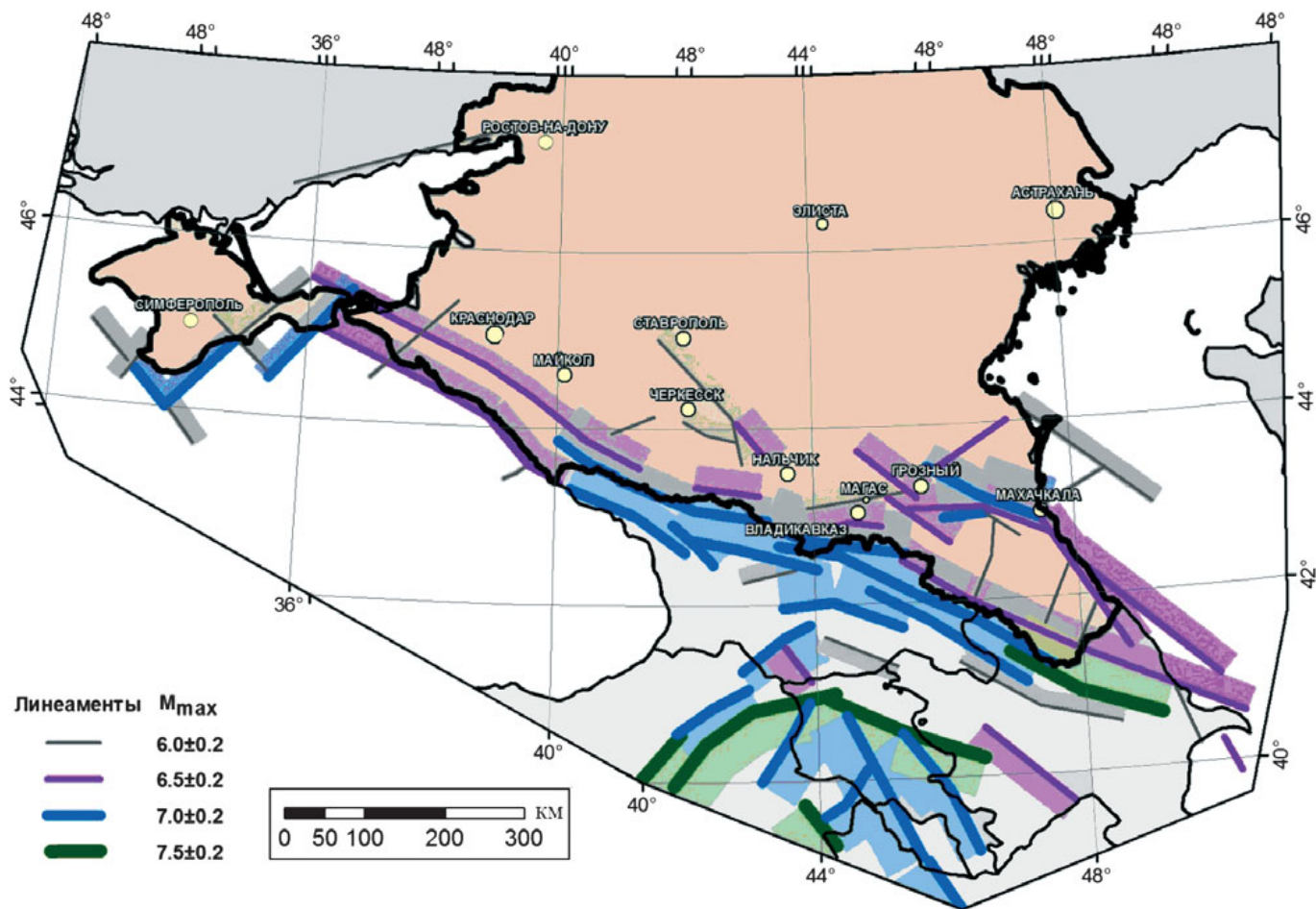


Рис. 11. Сейсмолинементы с разными максимальными магнитудами M_{max} в регионе 1.1.1 (жирные линии разных цветов) и проекции их плоскостей на земную поверхность («тени» соответствующих цветов)

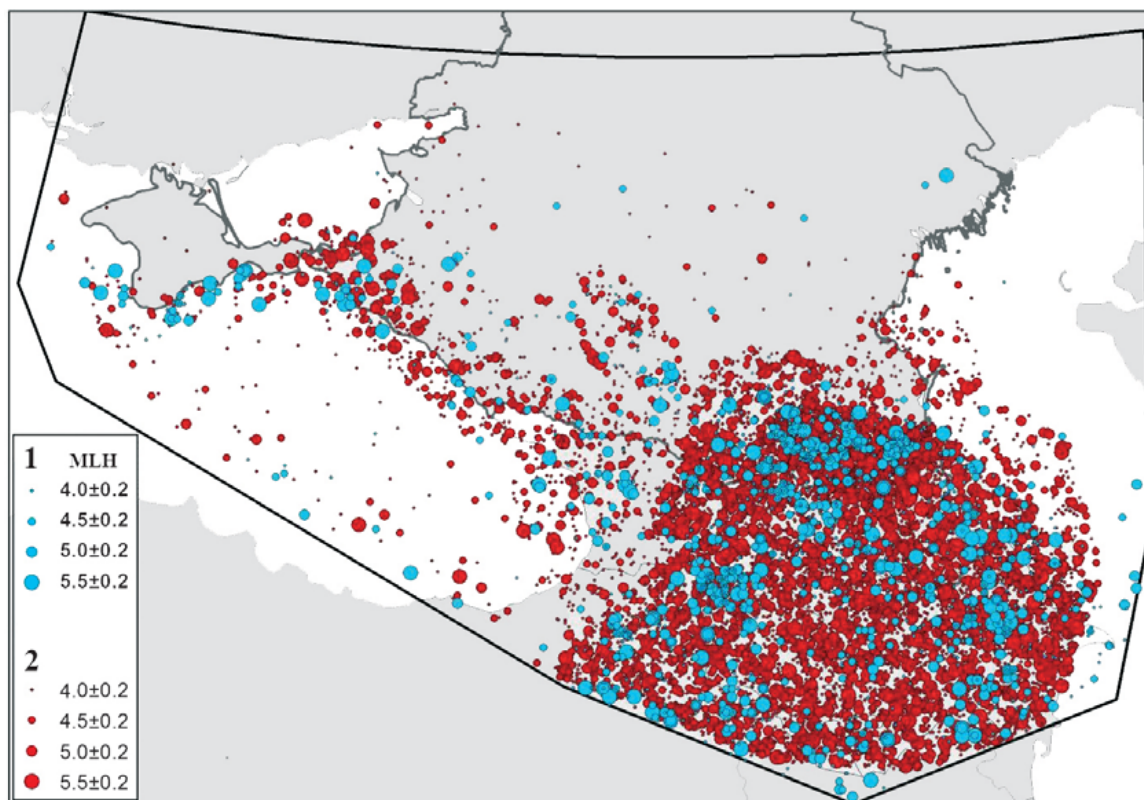


Рис. 12. Сопоставление реальных эпицентров всех известных землетрясений с различными магнитудами MLN в регионе 1.1.1 по «Специализированному каталогу землетрясений» (1) и одной из многочисленных случайных выборок (розыгрышей) из протяженного модельного каталога за период $T = 500$ лет, примененного при расчетах ОСР-2014 (2)

Таблица 1

Изменения площадей (S) зон разной балльности (I) на картах ОСР-2014 (А, В, С) Крымско-Северокавказского региона в процентах по сравнению с соответствующими площадями на картах ОСР-97 (А, В, С)*

I , балл	$100\% \cdot (S_{\text{ОСР-2014}} - S_{\text{ОСР-97}}) / S_{\text{ОСР-97}}$		
	А	В	С
≤ 5	-5	-47	-25
6	+15	+54	-57
7	+5	+1	+75
8	+35	+47	-5
9	-93	-41	+57
> 9	-	-	-72

* Площади на картах ОСР-97 приняты за 100%. Знак «-» означает уменьшение площади на карте ОСР-2014 по сравнению с ОСР-97, знак «+» — увеличение.

реальных эпицентров всех известных землетрясений с магнитудами MLH в регионе 1.1.1 в соответствии со «Специализированным каталогом землетрясений» (СКЗ) и одна из многочисленных случайных выборок («розыгрышей») из протяженного модельного каталога за период $T=500$ лет.

На рисунке 13 видно, что модельный график повторяемости землетрясений, построенный по синтезированному каталогу ОСР-2014, соответствует региональному. Модельный же график по синтезированному каталогу ОСР-97 существенно завышает повто-

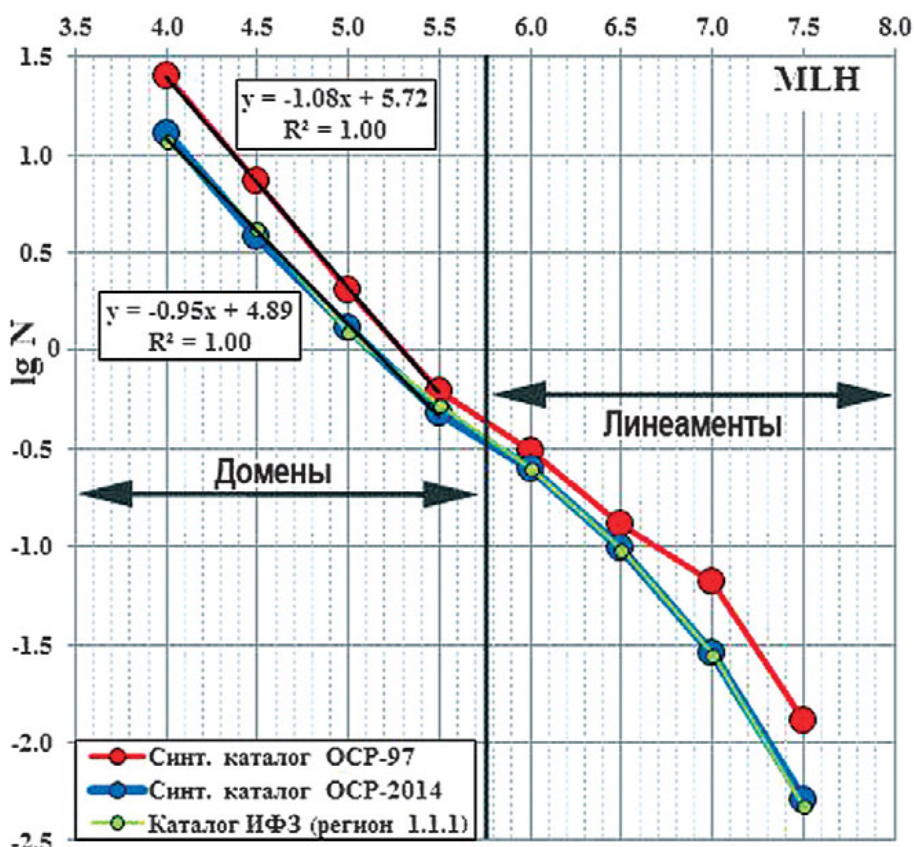


Рис. 13. Сопоставление графиков повторяемости землетрясений с различной магнитудой MLH , построенных по синтезированному (модельному) каталогу ОСР-97 и ОСР-2014 и по реальным сейсмическим событиям для региона 1.1.1 в полулогарифмическом масштабе (N — число землетрясений; R^2 — коэффициент детерминации)

ряемость землетрясений во всем диапазоне магнитуд, что в определенной мере способствовало появлению повышенных оценок сейсмической интенсивности на картах ОСР-97.

При построении карт ОСР-2014 в каждом регионе применялись уравне-

ния затухания сейсмического эффекта в зависимости от расстояния и магнитуд, свойственных данному региону (рис. 14), а не только простейшее уравнение Н.В. Шебалина, как это продолжают делать до сих пор некоторые исследователи при детальном сейсмическом

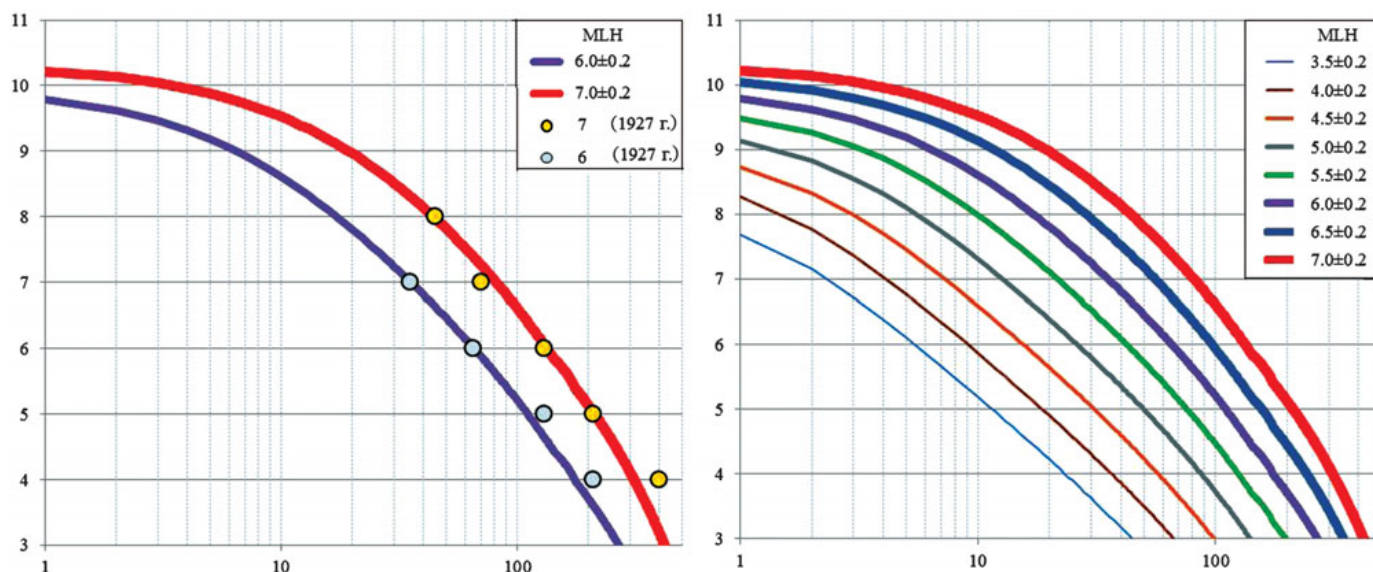


Рис. 14. Сопоставление модельных графиков затухания сейсмического эффекта в зависимости от расстояния и магнитуд MLH , свойственных данному региону (линии), и реальных данных (точки). Оси ординат — сейсмическая интенсивность, балл; оси абсцисс — расстояние от эпицентра, км

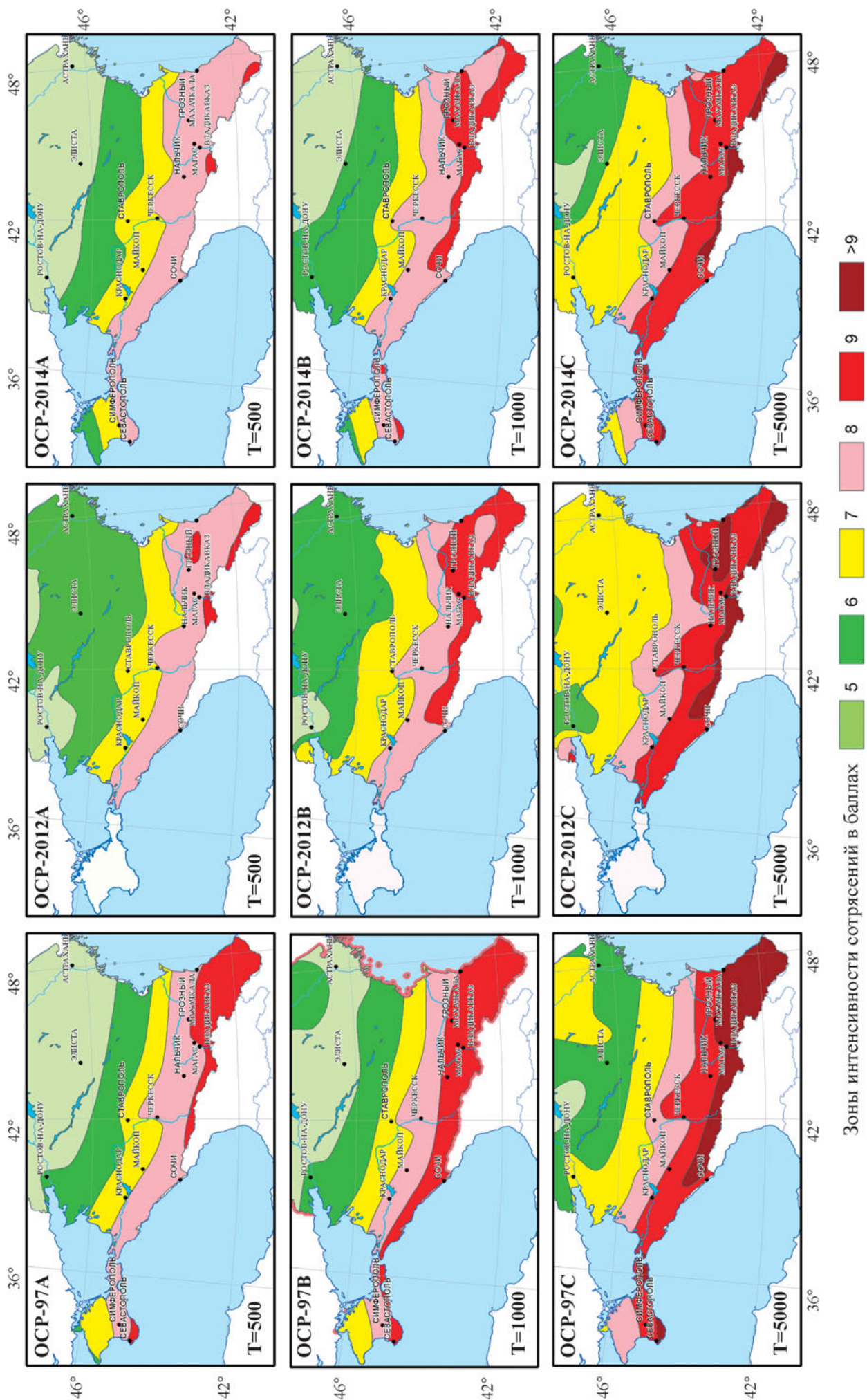


Рис. 15. Сопоставление фрагментов карт ОСР-97, ОСР-2012 и ОСР-2014 для Северного Кавказа и Крыма (T — период повторяемости, лет)

районировании (ДСР), в том числе для территории Северного Кавказа. Уравнения затухания должны выводиться на основе реальных макросейсмических данных.

На рисунке 15 сопоставлены фрагменты карт ОСР-97, ОСР-2012 и ОСР-2014 для территории Северного Кавказа и Крыма, а в таблице 1 сравнивается сейсмическая интенсивность в баллах для некоторых населенных пунктов этого региона.

На рисунке 16 приведены гистограммы сопоставления площадей зон балльности на картах ОСР-97 и ОСР-2014 в процентах относительно общей площади региона «Крым — Северный Кавказ — Предкавказье», северная граница которого совпадает с северной частью контура, принятой при расчетах доменной структуры, изображенной на рис. 5 5 и условно соответствующей границе между Скифской плитой и Восточно-Европейской платформой.

В таблице 1 показаны изменения площадей зон разной балльности на картах ОСР-2014 (А, В, С) Крымско-Северокавказского региона в процентах по сравнению с соответствующими площадями на картах ОСР-97 (А, В, С).

В таблице 2 сопоставлены оценки сейсмической интенсивности в баллах в населенных пунктах Северного Кавказа и Крыма по картам ОСР-97, ОСР-2004 и ОСР-2014.

Заключение

На основе многолетних совместных российско-украинских исследований в области оценки сейсмической опасности при активном участии ведущих сейсмологов Республики Крым была выполнена описанная в статье актуализация карт сейсмического районирования Крымско-Северокавказского региона в составе карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-2014, подготовленных для замены ОСР-97. Фрагменты этих карт для Крыма и Севастополя были согласованы с Крымским экспертным советом по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений (г. Симферополь) и переданы для ознакомления в Минстрой России [16].

Карты ОСР-2014 несколько отличаются от карт ОСР-97 по площадям зон разной балльности. В частности, это обусловлено тем, что при выполнении работ по ОСР-2014 была несколько модифицирована сейсмогеодинамическая регионализация исследуемой территории. Так, если при разработке карт ОСР-97

Сопоставление оценок сейсмической интенсивности в баллах в населенных пунктах Северного Кавказа и Крыма по картам ОСР-97, ОСР-2004 и ОСР-2014*

Населенный пункт	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃
Анапа	8	-	8	9	-	8	9	-	9
Армавир	7	-	7	7	-	7	8	-	8
Астрахань	5	-	5	5	-	5	6	-	6
Баксан	8	-	8	8	-	8	9	-	9
Бахчисарай	8	8	8	8	8	8	9	9	9
Белореченск	7	-	7	8	-	8	9	-	8
Беслан	8	-	8	9	-	9	9	-	9
Владикавказ	8	-	8	9	-	9	>9	-	9
Волгодонск	5	-	5	5	-	5	5	-	6
Грозный	8	-	8	9	-	9	>9	-	9
Гудермес	8	-	8	9	-	9	9	-	9
Дербент	9	-	8	9	-	9	>9	-	9
Джанкой	7	6	6	7	7	7	8	7	8
Евпатория	7	7	7	7	7	7	8	8	8
Ейск	6	-	6	6	-	6	7	-	7
Керчь	8	8	8	8	9	9	>9	>9	9
Кисловодск	8	-	8	8	-	8	9	-	9
Краснодар	7	-	7	8	-	8	9	-	9
Магас	8	-	8	9	-	9	>9	-	9
Майкоп	7	-	7	8	-	8	9	-	9
Махачкала	8	-	8	9	-	9	>9	-	9
Минеральные воды	8	-	7	8	-	8	9	-	9
Назрань	8	-	8	9	-	9	>9	-	9
Нальчик	8	-	8	9	-	8	9	-	9
Невинномысск	7	-	7	8	-	8	9	-	9
Ростов-на-Дону	6	-	5	6	-	6	7	-	7
Севастополь	9	8	8	9	9	8	>9	9	9
Симферополь	8	7	7	8	8	8	9	9	9
Сочи	8	-	8	9	-	8	9	-	9
Ставрополь	7	-	7	7	-	8	8	-	8
Тамань	8	-	8	9	-	8	>9	-	9
Феодосия	8	8	8	9	8	8	9	9	9
Черкесск	8	-	7	8	-	8	9	-	9
Элиста	5	-	5	5	-	6	6	-	7
Ялта	9	8	8	9	9	9	>9	>9	>9

* A₁, B₁, C₁ — карты ОСР-97 (соответственно А, В, С); A₂, B₂, C₂ — карты ОСР-2004 (соответственно А, В, С); A₃, B₃, C₃ — карты ОСР-2014 (соответственно А, В, С); карты ОСР-2004 — карты Крыма, бывшие нормативными в составе ОСР-2004 Украины.

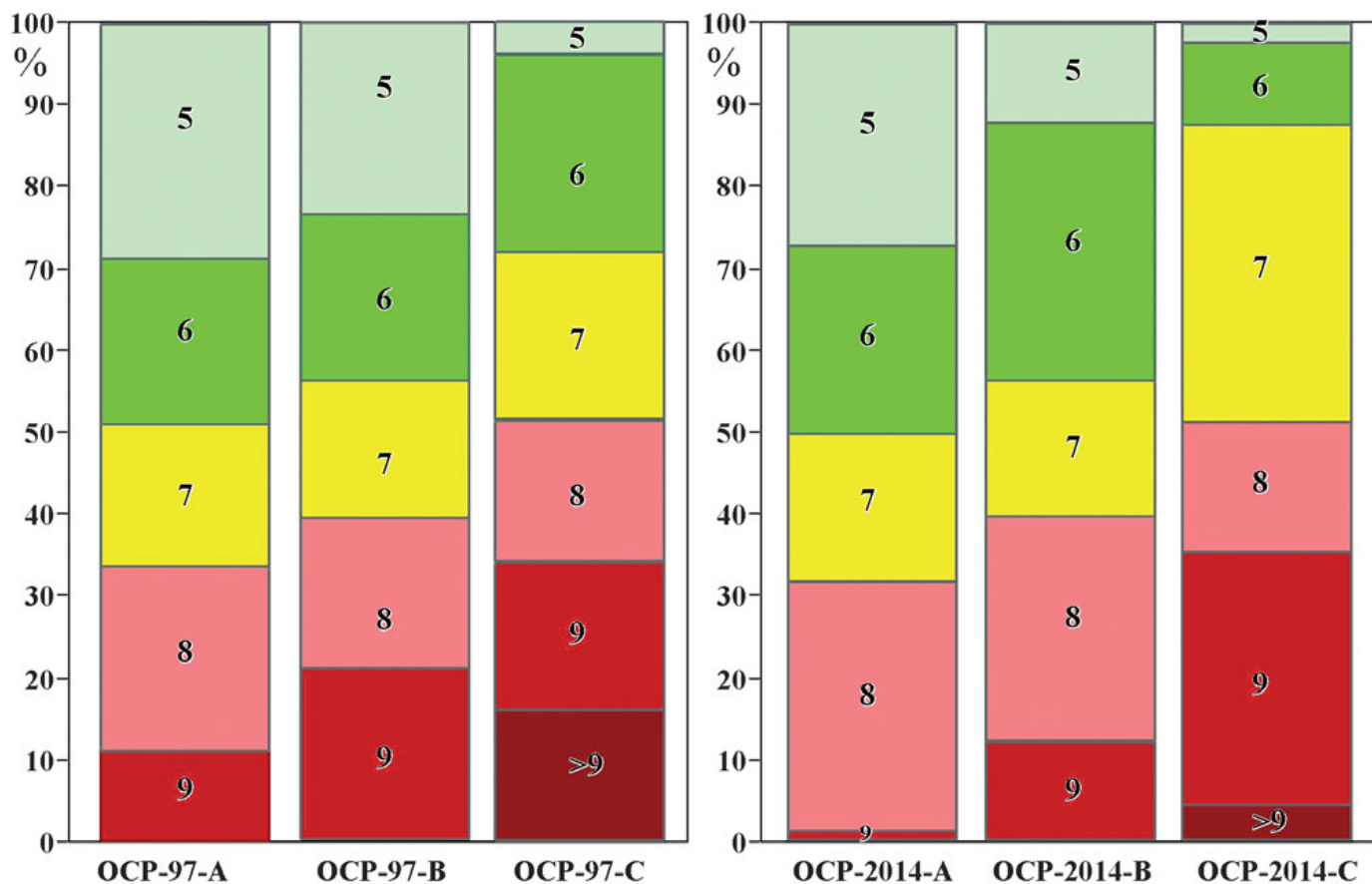


Рис. 16. Сопоставление площадей зон разной балльности на картах ОСР-97 и ОСР-2014 в процентах относительно общей площади региона «Крым — Северный Кавказ — Предкавказье». Интенсивность в баллах указана внутри прямоугольников, соответствующих разным зонам


рассматривались обширные территории Турции и Ирана, где было зарегистрировано большое число высокомагнитудных землетрясений и наблюдался несколько неоднородный сейсмический режим, то при создании ЛДФ-модели для карт ОСР-2014 этот регион был ограничен в соответствии с новыми представлениями об особенностях его новейшего и современного сейсмогеодинамического развития [22, 23]. Были откорректированы параметры сейсмолинементов и доменов, а также уточнены характеристики затухания сейсмического эффекта с расстоянием и в зависимости от магнитуды землетрясений.

Вместо применяемой при работах по ОСР-97 квадратной расчетной сетки с шагом 20 км при создании карт ОСР-2014 использовалась более корректная треугольная сетка с шагом 15 км.

Все эти новации, включая модификацию технологии сейсмологической параметризации доменов, позволили получить более обоснованное выделение зон с различной интенсивностью сейсмических воздействий для нормативных периодов их повторяемости 500, 1000 и 5000 лет.

Было показано, что даже для относительно небольшого по площади

Крымско-Северокавказского региона, сейсмичность которого изучена в значительно большей степени, по сравнению с другими сейсмоактивными регионами Российской Федерации, некорректно оперировать одним и тем же набором критериев при выделении зон ВОЗ и оценке их параметров в горных, предгорных и в равнинных районах Крыма, Северного Кавказа и Предкавказья.

Разработанные новые подходы к технологии районирования позволяют более объективно оценивать степень сейсмической опасности Крымско-Северокавказского региона. 

Список литературы

1. Бунэ В.И., Горшков Г.П., Кейлис-Борок В.И., Ризниченко Ю.В., Бутовская Е.М., Уломов В.И. и др. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г.: монография / под ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшкова. М.: Наука, 1980. 307 с.
2. Гусев А.А. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясений и ее применение к оценке сильного движения // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 3–22.
3. Гусев А.А., Павлов В.М., Шумилина Л.С. Новый подход к расчетам повторяемости сейсмического воздействия с целью построения карт сейсмического районирования / Материалы Научной конференции РФФИ, НГК РФ, ИС РАН по проблемам международного десятилетия по уменьшению опасности стихийных бедствий «Современная сейсмология: достижения и проблемы», г. Москва, 7–9 октября 1998 г. 26 с.
4. Гусев Г.С., Имаева Л.П. Новейшая и современная тектоническая (геодинамическая) активность территории России // Разведка и охрана недр. 2014. № 12. С. 23–29.

5. Гусев Г.С., Имаева Л.П., Акатова К.Н. Зонирование геодинамической активности неотектонических структур для целей общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2012 // *Материалы 7-й Общероссийской конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»*, г. Москва, 15–16 декабря 2011 г. М., 2011. С. 207–208.
6. Гусев Г.С., Межеловский Н.В., Морозов А.Ф. и др. Схема тектонического районирования России, масштаб 1:5 000 000. М.: ИМГРЭ, ГЕОКАРТ, 2001.
7. Никонов А.А., Габсатарова И.П. Северо-Азовский сейсмолинеament — активная и опасная структура / *Материалы 18-й Международной научно-практической конференции «Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы»*, г. Воронеж, 24–29 сентября 2012 г. С. 224–229.
8. Никонов А.А., Шварев С.В. Сейсмичность платформенного юга Европейской России в сопоставлении с морфоструктурами / *Материалы 12-й Международной конференции «Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения»*, г. Воронеж, 18–23 сентября 2006 г. Том 2. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2006. С. 23–26.
9. Перетокин С.А., Стром А.Л. Дифференцированный подход к сейсмогеодинамической регионализации как базис общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-2014 / *Материалы 9-й Международной научно-практической конференции «Геориск-2015»*. Том 1. М., 2015. С. 349–354.
10. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Борисенко Л.С., Поречнова Е.И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98) // *Геофизический журнал*. 1999. № 6. С. 3–15.
11. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности // *Геофизический журнал*. 2006. № 3. Т. 28. С. 54–77.
12. Уломов В.И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе Единой информационной системы «Сейсмобезопасность России» // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2012. Т. 39. № 1. С. 5–38.
13. Уломов В.И. Внимание! Землетрясение! Ташкент: Узбекистан, 1971. 160 с.
14. Уломов В.И. Глубинная структура земной коры сейсмоактивной территории Западного Узбекистана: монография / под ред. Ю.В. Ризниченко. Ташкент: ФАН, 1972. С. 6–18.
15. Уломов В.И. Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. Ташкент: ФАН, 1974. 218 с.
16. Уломов В.И. К вопросу о стандартизации норм и правил сейсмического районирования для сейсмостойкого строительства в Российской Федерации // *Инженерные изыскания*. 2015. № 10-11. С. 6–17.
17. Уломов В.И. Моделирование зон возникновения очагов землетрясений на основе решеточной регуляризации // *Физика Земли*. 1998. № 9. С. 20–38.
18. Уломов В.И. О соотношении размеров очагов и областей подготовки землетрясений // *Доклады Академии наук УзССР*. 1987. № 9. С. 39–40.
19. Уломов В.И. Об инженерно-сейсмологических изысканиях в строительстве // *Инженерные изыскания*. 2009. № 9. С. 28–39.
20. Уломов В.И. Решеточная модель очаговой сейсмичности и прогноз сейсмической опасности // *Узбекский геологический журнал*. 1987. № 6. С. 20–25.
21. Уломов В.И., Богданов М.И. Новый комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012) // *Инженерные изыскания*. 2013. № 8. С. 30–39.
22. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П. О сейсмогеодинамике линейментных структур горного обрамления Скифско-Туранской плиты // *Физика Земли*. 2006. № 7. С. 17–33.
23. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе // *Физика Земли*. 2007. № 7. С. 31–45.
24. Уломов В.И., Медведева Н.С. О прогнозе сейсмичности в западной части Крым-Кавказ-Копетдагской сейсмогенной структуры // *Труды Международной научной конференции «Уроки и следствия сильных землетрясений (к 80-летию разрушительных землетрясений в Крыму)»*. Ялта, 2007. С. 156–158.
25. Уломов В.И., Перетокин С.А. Об актуализации нормативных карт сейсмического районирования территории Российской Федерации // *Инженерные изыскания*. 2010. № 1. С. 44–53.
26. Уломов В.И., Перетокин С.А., Медведева Н.С., Акатова К.Н., Данилова Т.И. Сейсмологические аспекты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (карты ОСР-97, ОСР-2012, ОСР-2014) // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2014. № 4. С. 5–24.
27. 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.: Изд-во ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
28. Balassanian S., Giardini D., Ulomov V., Ashirov T., Chelidze T., Gassanov A., Kondorskaya N., Molchan G., Pustovitenko B., Trifonov V., Erdik M., Ghafory-Ashtiany M., Grunthal G., Mayer-Rosa D., Schenk V., Stucchi M. Seismic hazard assessment for the Caucasus test area // *Annali di Geofisica*. 1999. V. 42. P. 1139–1151.
29. Shebalin N.V., Trifonov V.G., Kozhurin A.I., Ulomov V.I., Tatevossian R.E., Ioffe A.I. A unified seismotectonic zonation of Northern Eurasia // *Journal of Earthquake Prediction Research*. Beijing — Moscow: UIPE, SSB. 2000. V. 8. № 1. P. 8–31.
30. The global seismic hazard assessment program 1992–1999 / ed. by D. Giardini // *Annali di Geofisica*. 1999. V. 42. № 6. 248 p.
31. Ulomov V. On the identification and seismological parameterization of earthquake source zones. The Caucasus and adjacent area // *Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus*. NATO ASI. Series 2. Environment. V. 28. ILP Publication № 333. Dordrecht — Boston — London: Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 503–522.
32. Ulomov V.I. Seismic hazard of Northern Eurasia (GSHAP Region 7) // *Annali di Geofisica*. Working Group of the GSHAP, 1999. V. 42. P. 1023–1038.