

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА

© 2017 г. В. И. Ларионов*, Н. И. Фролова*, А. Н. Угаров*, С. П. Сушев**, М. А. Козлов**,
Н. А. Малаева*, Т. В. Барская*

* Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия. E-mail: frolovanina7@gmail.com

** Центр исследований экстремальных ситуаций (ООО ЦИЭКС),
Вятская ул., д. 35, Москва, 127015 Россия. E-mail: esrc@esrc.ru

Поступила в редакцию 01.03.2016 г.

Для реализации стратегии уменьшения социальных и экономических потерь от землетрясений первым и важным шагом являются исследования по оценке и картированию сейсмического риска на разных уровнях. Информация о возможном ущербе и ожидаемом числе пострадавших сразу после события также очень важна для принятия решения о поисково-спасательных операциях и оказании гуманитарной помощи.

В статье описываются методические подходы к моделированию последствий землетрясений с применением ГИС-технологий. Приводятся примеры оценки и картирования сейсмического риска для территории Российской Федерации на разных уровнях, а также результаты моделирования последствий землетрясения 21 июля 2013 года в Китае в оперативном режиме.

Анализируется влияние исходных данных и неточностей моделей на надежность оценок риска в заблаговременном и оперативном режимах.

Ключевые слова: моделирование, последствия землетрясений, сейсмический риск, карты, ГИС-технологии, надежность оценок потерь.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных задач современной науки – защита населения от природных и природно-техногенных катастроф. Сейсмические события и связанные с ними негативные природные и техногенные воздействия чаще всего приводят к гибели людей и значительным экономическим ущербам.

Согласно данным Центра эпидемиологии катастроф в Брюсселе, за последние 30 лет произошло около 7 тыс. природных катастроф, унесших жизни более 2 млн человек и повлекших за собой значительный материальный ущерб. В первой половине 2015 г. по информации этого центра (www.cred.be), зарегистрировано 138 природных катастроф в 68 странах. В результате этих событий погибло более 15 тыс. человек и пострадало более 15 млн человек; экономический ущерб превысил 13 млрд амер. долларов. Только землетрясения в Непале 25 апреля и 12 мая 2015 г. унесли жизни 8.8 тыс. человек, а экономический ущерб составил почти 4 млрд амер. долларов, что является огромной суммой для страны.

Несмотря на значительный прогресс в последние десятилетия в изучении катастрофических природных событий и связанных с ними вторичных процессов, по большей части, эти явления природы остаются не предсказуемыми. В мире в целом сейсмический риск все еще остается довольно высоким. В первую очередь, это характерно для районов с быстрым ростом населения и недостатком финансирования мероприятий по усилению существующей застройки на случай сильного землетрясения. Вопросы обеспечения безопасности населения и территорий от сейсмических катастроф и связанных с ними вторичных опасностей остаются крайне актуальными.

Для реализации стратегии уменьшения потерь от землетрясений первым и важным шагом являются исследования по оценке и картированию сейсмического риска на разных уровнях. Информация о возможном ущербе и ожидаемом числе пострадавших сразу после события также очень важна для принятия решения о поисково-спасательных операциях и оказании гуманитарной помощи.

В статье описываются методические подходы к моделированию последствий землетрясений,

приводятся примеры оценки и картирования сейсмического риска на разных уровнях с применением ГИС-технологий, анализируются влияния исходных данных и неточностей моделей на надежность оценок риска в заблаговременном и оперативном режимах.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РИСКА

При проведении расчетов потерь от землетрясений и сейсмического риска в РФ, как и в большинстве стран мира, придерживаются единой концепции, принятой и описанной в руководствах ООН и трудах международных и европейских конференций по инженерной сейсмологии и сейсмостойкому строительству [6, 11, 15–18]. Согласно этой концепции, сейсмический риск определяется как суперпозиция сейсмической опасности и уязвимости различных элементов риска (люди, инженерные сооружения гражданского и промышленного назначения, линии жизнеобеспечения, другие составляющие инфраструктуры, экономическая и коммерческая деятельность и т.д.).

В Руководстве по оценке и картированию природного и техногенного риска на территории стран Европейского Союза (ЕС) находит дальнейшее развитие та же концепция (<http://register.consilium.europa.eu/pdf/en/10/st17/st17833.en10.pdf>) [17].

Концепция ООН легла в основу “Методики прогнозирования последствий землетрясений” [4], разработанной совместно сотрудниками лаборатории сейсмического риска ИГЭ РАН с ООО ЦИЭКС в рамках ФЦП “Безопасность населения и территорий...” и “Федеральная система сейсмологических наблюдений”. В последующие годы в рамках ФЦП “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года” и “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года” выполнены исследования по совершенствованию методик оценки и картирования риска, а также подготовлены соответствующие Руководства для проведения работ на локальном, региональном и федеральном уровнях.

В методиках излагается процедура оценки индивидуального сейсмического риска R_s . Индивидуальный риск R_s определяется как вероятность смертельного исхода R_{s1} и/или потери здоровья

населения R_{s2} и/или вероятность понести людьми материальные убытки R_{s3} за 1 год при стихийном бедствии на рассматриваемой территории. Индивидуальный сейсмический риск R_s есть суперпозиция сейсмической опасности H и сейсмической уязвимости V_s . Уязвимость населения для сейсмической опасности в настоящей статье определяется как отношение между ожидаемым количеством пострадавших, включая погибших, раненых и понесших материальный ущерб, к общему количеству людей, размещенных в однотипных зданиях и/или в зданиях различных типов населенного пункта в целом. Индивидуальный сейсмический риск R_s [3, 5, 9, 12–14] может быть рассчитан через математическое ожидание социальных потерь $M(N)$, в том числе убитых, раненых и понесших материальный ущерб, с учетом общего количества жителей N в рассматриваемом населенном пункте и вероятности сейсмического события H :

$$R_s = H \cdot V_s(I) = H \cdot M(N) / N, \quad (1)$$

где $V_s(I)$ – сейсмическая уязвимость населения для рассматриваемого населенного пункта; H – вероятность сейсмического события в течение года; N – общее число жителей в рассматриваемом населенном пункте.

Математическое ожидание $M(N_j)$ числа пострадавших в зданиях определенного j -го типа по населенному пункту в целом с учетом миграции населения определяется по формуле:

$$M(N_j) = \iint_{S_c} \int_0^{24} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P_{C_j}(I) \cdot f(x, y, I) \cdot \Psi_j(x, y) \cdot f(t) dI dt dx dy, \quad (2)$$

где I_{\min} и I_{\max} – максимально и минимально возможные интенсивности сотрясений; S_c – площадь населенного пункта; $P_{C_j}(I)$ – вероятность смертельного исхода, ранения и потери имущества при условии повреждения зданий j -го типа от сейсмического воздействия с интенсивностью I ; $f(x, y, I)$ – плотность вероятности случайной величины I в точке с координатами x, y ; $\Psi_j(x, y)$ – плотность населения в зданиях j -го типа в пределах рассматриваемой площадки; $f(t)$ – функция, характеризующая размещение людей в зданиях в течение суток, получаемая на основе статистической обработки информации по перемещению людей в течение 24 часов. Расчет $P_{C_j}(I)$ проводится по формуле:

$$P_{C_j}(I) = \sum_{i=1}^5 P_{Bi}(I) \cdot P(C_j / Bi), \quad (3)$$

где $P_{C_j}(I)$ – вероятность поражения людей при землетрясении интенсивностью I ; $P_{B_i}(I)$ – вероятность наступления i -й степени повреждения здания при заданном значении интенсивности землетрясения; $P(C_j/B_i)$ – вероятность получения людьми j -й степени поражения при условии, что наступила i -я степень повреждения здания.

Расчет $P_{C_j}(I)$ обычно проводится для зданий и сооружений, классифицированных по шкале MMSK-86 [10]: тип А – здания со стенами из местных строительных материалов (глинобитные без каркаса, из самана или сырцового кирпича); тип Б – здания с деревянным каркасом с заполнителем из самана или глины и легкими перекрытиями, из жженого кирпича или бетонных блоков на цементном растворе, деревянные щитовые дома; тип В – рубленые деревянные дома в “лапу”, железобетонные, каркасные, крупнопанельные и армированные крупноблочные дома; типы С7, С8, С9 – здания и типовые сооружения всех видов с антисейсмическими мероприятиями для расчетной сейсмичности 7, 8 и 9 баллов соответственно.

Математическое ожидание социальных потерь населения $M(N)$ для рассматриваемого населенного пункта в целом с учетом миграции населения во всех типах зданий в течение суток определяется по формуле:

$$M(N) = \sum_{j=1}^n \iint_{S_c} \int_0^{24} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P_{C_j}(I) \cdot f(x, y, I) \cdot \Psi_j(x, y) \cdot f(t) dI dt dx dy, \quad (4)$$

где n – число рассматриваемых типов зданий в соответствии со шкалой MMSK-86.

Размерность индивидуального риска – 1/год (год⁻¹).

ИНСТРУМЕНТЫ И БАЗА ЗНАНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ И КАРТИРОВАНИЯ РИСКОВ

Для проведения расчетов и картирования рисков на разных уровнях (глобальный, федеральный, региональный, локальный) по выше описанной методике создаются специальные ГИС-проекты семейства “Экстремум” – готовые к использованию продукты со всеми элементами, присущими автоматизированной информационной системе специального назначения. Они включают базы данных с информацией, описывающей свойства территории мира, РФ, отдельных

регионов и городов; программные средства, предназначенные для вычисления показателей опасности и риска; интерфейс, с помощью которого формируются тематические карты и текстовые отчеты установленной формы.

Базы данных содержат информацию, описывающую географическое положение территории, ее структуру, основные ориентиры и форму границ. Этот информационный блок базы данных назван “картографической основой” проектов. Тематическое содержание баз данных представляется пространственной информацией, описывающей границы зон распространения сейсмической опасности в соответствии с картами разного масштаба. Специальное содержание баз данных представляется информацией, характеризующей степень опасности и ее повторяемость, а также описанием событий, связанных с потерями и ущербом в случае реализации событий за период 1992–2008 гг. Все элементы блока имеют географическую привязку или координатное описание границ.

При оценке потерь на глобальном уровне особое внимание уделяется базе знаний о социальных, физических и экономических последствиях сильных землетрясений мира, которая используется для калибровки глобальной версии ГИС “Экстремум”. В настоящее время авторами накоплено более 1500 хорошо документированных описаний сильных событий мира за последние 100 лет. События равномерно распределены по годам, сейсмоопасным регионам и тяжести потерь. Для формирования и анализа базы знаний о прошлых событиях создано специальное программное обеспечение, позволяющее проводить расчеты возможных последствий и накапливать результаты, а также исключать грубые ошибки из описаний. Используемая в настоящее время в Национальном центре управления в кризисных ситуациях МЧС России глобальная версия ГИС “Экстремум” откалибрована на основе этой базы знаний. Величина остаточной погрешности не превышает 60%.

Программные средства специализированных ГИС проектов представляются тремя блоками, реализующими три набора разнохарактерных функций:

- отображение пространственной информации на экране в виде тематических карт указанного масштаба;
- расчет совокупности показателей, являющихся темой отображаемой карты;

Таблица 1. Детальность семантических баз данных в зависимости от уровня решаемых задач

Уровень оценки сейсмического риска	Информация о застройке	Информация об уровне сейсмической опасности
Трансграничный (глобальный)	Количество населенных пунктов на единицу площади по типам – модели застройки населенных пунктов (по государствам)	Карты сейсмичности Земли, разрабатываемые в рамках международных проектов
Федеральный	Региональные модели застройки населенных пунктов по типам – территориальные модели застройки населенных пунктов	Карты общего сейсмического районирования территории РФ
Региональный	Территориальные модели застройки населенных пунктов по типам – населенные пункты	
Территориальный	Населенные пункты – кварталы	Карты детального сейсмического районирования
Местный	Кварталы – здания	Карты сейсмического микрорайонирования
Локальный	Здания – конструкции зданий	

Таблица 2. Детальность математических моделей в зависимости от уровня решаемых задач

Уровень оценки риска	Детальность моделей	Формы представления рисков на картах
Трансграничный (глобальный)	Использование укрупненных показателей на основе экономического развития стран – применение континентальных моделей воздействия и функций уязвимости	Гипсометрические слои – изолинии с равными уровнями риска
Федеральный	Применение региональных моделей воздействия и функций уязвимости	Гипсометрические слои – значки разного цвета и размера
Региональный		
Территориальный	Применение территориальных моделей воздействия и функций уязвимости – использование инженерных методов расчета	Значки разного цвета и размера
Местный	Использование инженерных методов расчета – применение численных методов решения задач	Зоны (кварталы населенных пунктов) разного цвета
Локальный	Применение числовых методов оценки динамических параметров колебаний грунта и прочностных свойств конструкций; анализ “деревьев отказов и событий”	Количественный показатель риска для объекта

– выполнение функций записи, поддержки целостности, извлечения и модификации данных.

СУБД, визуализатор карт и тематическое приложение не исчерпывают всего набора программных средств проектов, в которых важную роль играет интерфейс, обеспечивающий эффективный инструмент взаимодействия пользователя с функциями автоматизированной информационной системы.

В качестве основных источников информации в специализированных проектах используются цифровые и бумажные географические карты разных масштабов; тематические карты с описанием ареалов распространения сейсмической

опасности и возможных вторичных процессов природного и техногенного характера; статистические выборки с описанием мест и величины ущерба от землетрясений с учетом вторичных явлений; база данных о распределении населения и характеристике застройки.

В качестве основного источника данных об уровне сейсмической опасности используются карты общего сейсмического районирования территории РФ, карты детального сейсмического районирования регионов, карты сейсмического микрорайонирования территорий городов, карты зон ВОЗ и матрицы сотрясаемости; в случае оперативных оценок потерь на глобальном уровне

используются данные о параметрах землетрясения, определенные службами срочных донесений РФ и мира.

При расчете индивидуального сейсмического риска R_s на разных уровнях используются исходные данные разной детальности (табл. 1) и модели, соответствующие уровню решаемых задач (табл. 2). За исключением местного и локального уровней, при расчетах риска используются модели, опирающиеся на усредненные показатели.

Результаты расчета сейсмического риска наиболее часто отображаются на тематических картах методом значков, количественного и качественного фона или их сочетанием. В случае, когда необходимо отобразить вклад вторичных опасностей в интегральное значение сейсмического риска, используется метод диаграмм. При отображении пространственного распределения индивидуального сейсмического риска на федеральном и региональном уровнях (см. табл. 2), как правило, используется сочетание методов значков и количественного фона. Карты сейсмического риска на таком уровне включают два элемента: риск для малых населенных пунктов с численностью жителей менее определенного значения и риск для крупных городов с численностью жителей более этого выбранного значения. При визуализации потерь от землетрясений на глобальном уровне, как правило, строятся карты с указанием вероятных средних степеней повреждения постройкам города и вероятного распределения сейсмической интенсивности на территории, подверженной землетрясению.

Ниже приводятся примеры оценки сейсмического риска на разных уровнях и оперативная оценка потерь для сейсмоопасных регионов мира.

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА НА ФЕДЕРАЛЬНОМ УРОВНЕ

Первая карта индивидуального сейсмического риска (ИСР) для населения Российской Федерации была построена авторами в 2000 г. в соответствии с вышеописанной процедурой (рис. 1) и включена в первый в истории России “Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации” [1].

Для оценки и картирования сейсмического риска на федеральном уровне был собран и проанализирован материал региональных центров МЧС РФ о распределении застройки разного типа, классифицированной по сейсмической шкале MMSK-86. Класс и местоположение населенных пунктов определены по Российским топографическим картам масштаба 1 : 200 000. Всего в расчетах

использованы данные о более чем 150 000 населенных пунктах.

Информация о сейсмической опасности взята с комплекта карт общего сейсмического районирования ОСР-97 А, В и С (М 1 : 5 000 000), соответствующих 10%-й (А), 5%-й (В) и 1%-й (С) вероятности превышения расчетной интенсивности для фиксированного интервала времени $t = 50$ лет или 90%-й вероятности не превышения указанных на картах значений интенсивности в течение следующих фиксированных интервалов времени, соответственно $t = 50$ (А), 100 (В) и 500 (С) лет [2].

Для определения показателей риска реализованы следующие этапы: оценка уязвимости, т.е. распределения степеней повреждений зданий различного типа по вероятностям для каждого значения интенсивности; оценка возможных социальных потерь — распределения числа пострадавших для населенных пунктов для рассматриваемой интенсивности землетрясений; оценка индивидуального риска — вероятности гибели одного человека за год для населенных пунктов. Для оценки возможных социальных потерь в больших населенных пунктах город разбивался на элементарные площадки, а их координаты представлялись точкой, расположенной в центре площадки. Затем показатели, полученные для отдельных площадок, суммировались. Для 170 крупных городов России при отображении значений ИСР использован способ значков. Размер значка зависит от числа жителей, а цвет определяет величину сейсмического риска. Полученные оценки риска (см. рис. 1) изменяются от пренебрежимо малых значений близких к нулю до весьма высоких, равных 50.0×10^{-5} год⁻¹ и более. Наибольшие значения ИСР характерны для населенных пунктов Сахалина, Курильских островов, Камчатки, Прибайкалья, Саян и Северного Кавказа. В этих регионах необходимо принимать специальные меры по снижению уровня риска.

В 2010 г. после уточнения данных об уязвимости элементов риска в рамках ФЦП “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года” авторами были построены карты ИСР для населения Российской Федерации:

- R_{s1} — смертельный исход в случае сильного землетрясения;
- R_{s2} — смертельный исход и/или травмы различной тяжести в случае сильного землетрясения;



Рис. 1. Карта индивидуального сейсмического риска R_1 [10^{-5} год $^{-1}$] для населения Российской Федерации; значения риска в населенных пунктах с числом жителей менее 50 тыс.: 1 – менее 0.5, 2 – 0.5-1, 3 – 1-5, 4 – 5-10, 5 – 10-20, 6 – 20-50, 7 – 50 и более; в населенных пунктах с числом жителей более 50 тыс.: 8 – менее 0.5, 9 – 0.5-1, 10 – 1-5, 11 – 5-10, 12 – 10-20, 13 – 20-50; численность жителей в населенных пунктах (тыс. чел.), где: 14 – менее 200, 15 – 200-500, 16 – 500-1000, 17 – 1000 и более.



Рис. 2. Карта индивидуального сейсмического риска R_2 [10^{-5} год $^{-1}$] для населения Российской Федерации; значения риска по административным районам: 1 – менее 0.1, 2 – 0.1-1, 3 – 1-5, 4 – 5-10, 5 – 10-30, 6 – 30-100, 7 – более 100.

Таблица 3. Интервалы изменения значений ИСР и размеры площадей зон с разным уровнем риска; площадь территории РФ составляет 17 075 400 км²

Границы интервалов риска, 10^{-5} год ⁻¹	Количественная характеристика риска	Площади зон (%) по карте		
		R_{s1}	R_{s2}	R_{s3}
меньше 0.1	малый	53	49	46
0.1–1.0	умеренный	15	17	13
1.0–5.0	средний	14	9	11
5.0–10.0	высокий	7	8	5
10.0–30.0	весьма высокий	8	9	12
30.0–100.0	недопустимо высокий	3	7	10
100.0–150.0		–	1	1
больше 150.0		–	–	2

– R_{s3} – смертельный исход и/или травмы различной тяжести и/или понесшие материальные убытки в случае сильного землетрясения.

На рис. 2 показана карта индивидуального сейсмического риска R_{s2} . Полученные значения рисков для отдельных городов и населенных пунктов осреднялись в пределах административных районов РФ. Они изменяются от пренебрежимо малых значений близких к нулю до весьма высоких – более $30 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹ для смертельного исхода (карта R_{s1}), более $100 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹ для смертельного исхода и травм различной тяжести (карта R_{s2}), более $150 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹ для смертельного исхода, травм различной тяжести и понесших материальные убытки (карта R_{s3}). В табл. 3 приведены размеры площадей зон с разным уровнем риска в соответствии с картами R_{s1} , R_{s2} и R_{s3} .

Приведенные в разделе примеры обзорных карт сейсмического риска позволяют выявлять районы с относительно высоким уровнем, в которых требуется проведение более детальных исследований.

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Региональные карты сейсмического риска R_{s1} обычно строятся для районов с относительно высоким уровнем риска (более $5 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹) и высокой плотностью населения для уточнения осредненных оценок, полученных на федеральном уровне. В качестве исходной информации об уровне сейсмической опасности могут использоваться как карты ОСР (М 1 : 5000 000) и карты ДСР (М 1 : 500 000 или 1 : 200 000), так и матрицы сейсмической сотрясаемости для рассматриваемого региона. В рамках специализированных региональных ГИС-проектов также уточняется

информация о застройке городов и населенных пунктов региона; разрабатываются уточненные модели городов (процент зданий разного типа, классифицированных по шкале ММСК-86 и их средние высоты).

В течение последних 15 лет авторами выполнены оценки сейсмического риска и построены карты индивидуального сейсмического риска для населения Краснодарского и Ставропольского краев, Иркутской, Читинской и Камчатской областей, Республики Бурятия. На рис. 3 приведен пример региональной карты сейсмического риска.

Полученные оценки риска R_{s1} для Краснодарского края варьируют от пренебрежимо малых значений, близких к нулю, до весьма высоких, равных $40.0 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹ и более. В табл. 4 приведены размеры площадей с разным уровнем риска. Для более 30% территории Краснодарского края индивидуальный сейсмический риск R_{s1} превышает значение, равное $1.0 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹.

Сравнение усредненных оценок риска, полученных на уровне страны, и более детальных оценок, полученных на региональном уровне, позволило выявить аномальные значения риска на региональных картах за счет увеличения детальности в описании сейсмической опасности, а также за счет уточнения уязвимости существующих зданий. В качестве примера (табл. 5) приводятся результаты оценок риска R_{s1} для населения Северного Кавказа, полученные на федеральном уровне с использованием карт ОСР-97 (см. рис. 1 и 2) и региональном уровне с использованием уточненных в 2013 г. [7] матриц сотрясаемости для региона (рис. 4).

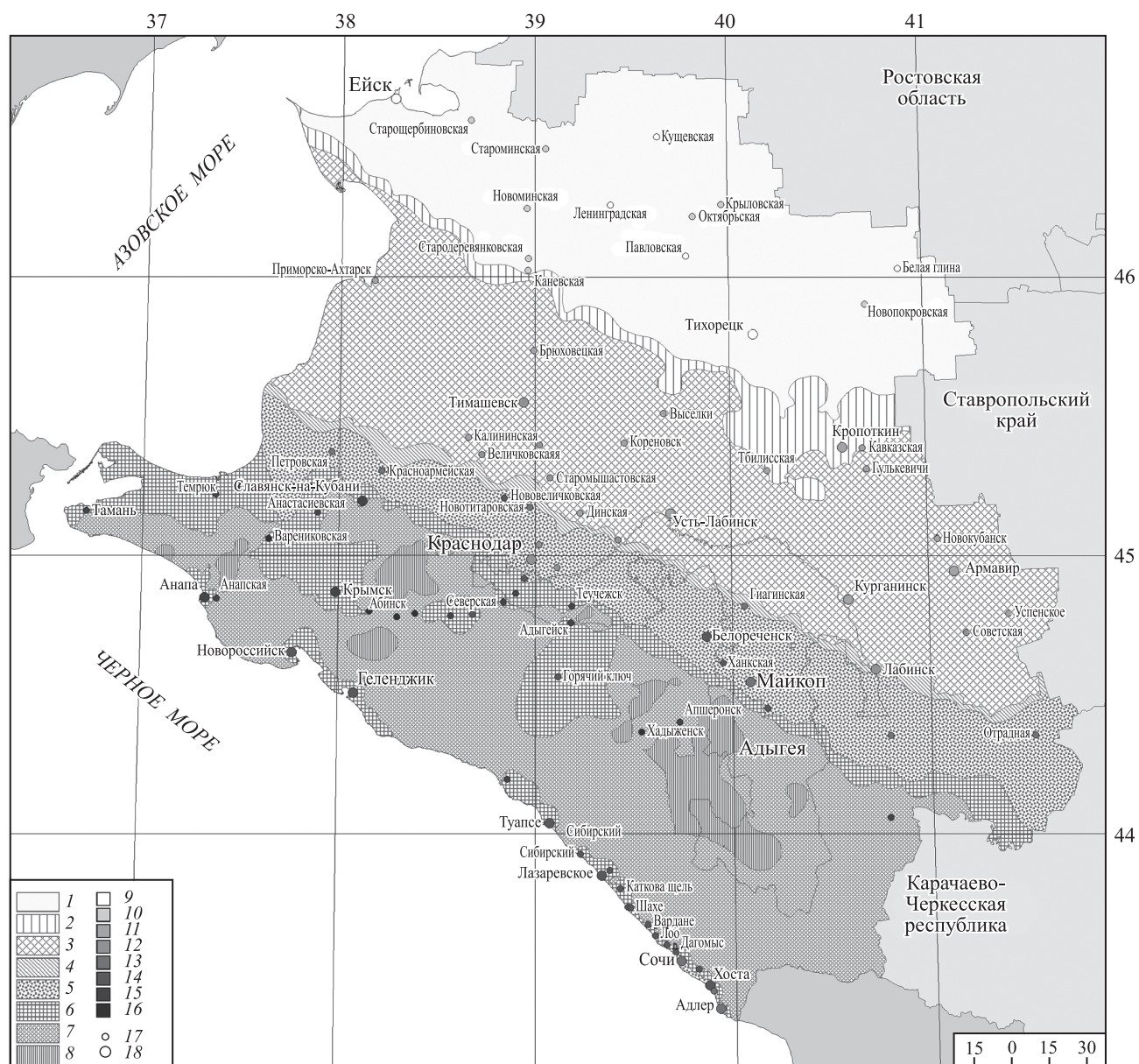


Рис. 3. Карта индивидуального сейсмического риска R_{s1} [10^{-5} год $^{-1}$] для населения Краснодарского края; значения риска для застроенных территорий: 1 – менее 0,5, 2 – 0,5-1, 3 – 1-5, 4 – 5-10, 5 – 10-20, 6 – 20-30, 7 – 30-40, 8 – 40 и более; в населенных пунктах с числом жителей более 1 тыс.: 9 – менее 0,5, 10 – 0,5-1, 11 – 1-5, 12 – 5-10, 13 – 10-20, 14 – 20-30, 15 – 30-40, 16 – 40 и более; численность жителей в населенных пунктах (тыс. чел.): 17 – 10-50, 18 – более 50.

Таблица 4. Размеры площадей в кв. км с разным уровнем риска для Краснодарского края

Номер интервала	Границы интервала, 10^{-5} год $^{-1}$	Размер площади, %
1	<0,5	21,8
2	0,5–1,0	3,6
3	1,0–5,0	26,4
4	5,0–10,0	1,7
5	10,0–20,0	11,7
6	20,0–30,0	9,0
7	30,0–40,0	22,6
8	более 40,0	3,2

Таблица 5. Значения сейсмического риска $R_s I$ и размеры зон с разным уровнем риска для Северного Кавказа; общая площадь 258 300 км²

Диапазоны риска $R_s I$, 10 ⁻⁵ год ⁻¹	Размеры зон $R_s I$ с использованием карт ОСР-97, %	Размеры зон $R_s I$ с использованием матриц сотрясаемости, %
< 10	59.46	66.97
10–20	7.38	13.26
20–30	11.84	11.14
30–50	12.15	7.76
> 50	9.17	0.87

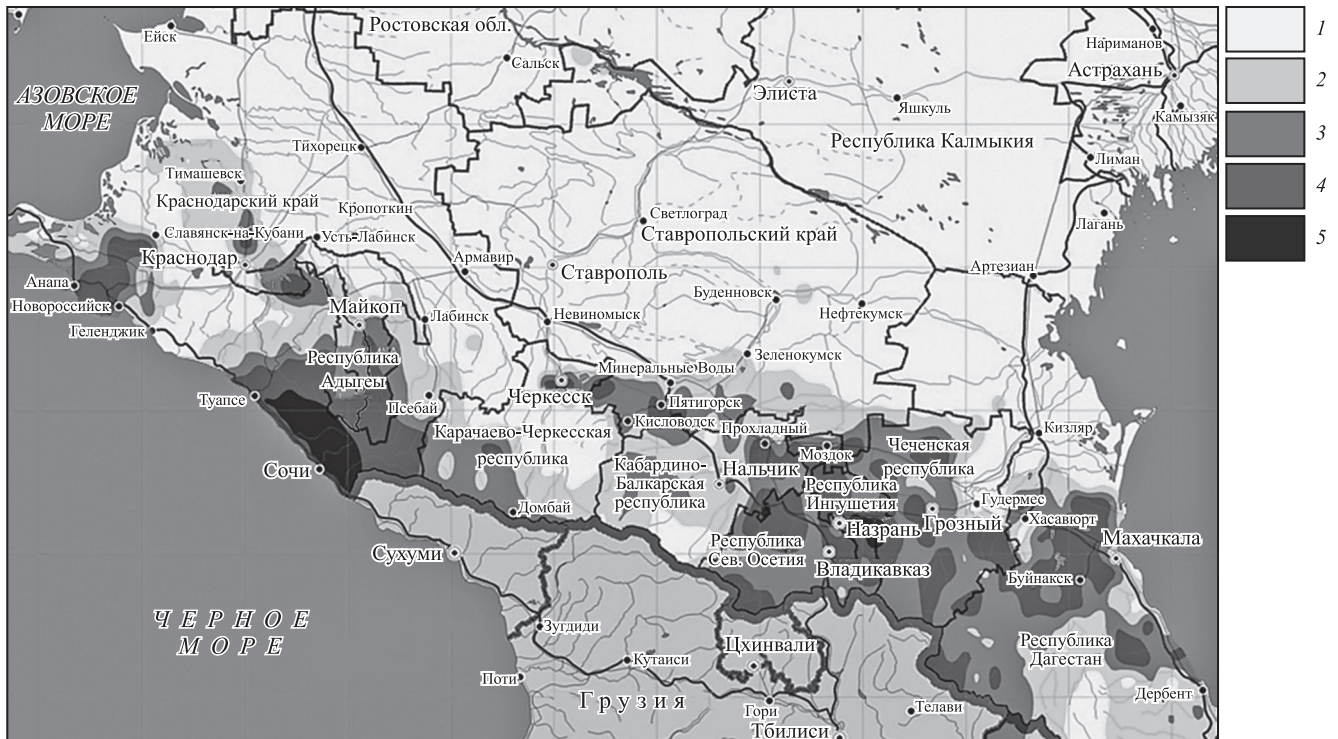


Рис. 4. Карта сейсмического риска $R_s I [10^{-5} \text{ год}^{-1}]$ для территории Северного Кавказа: 1 – <10; 2 – 10-20; 3 – 20-30; 4 – 30-50; 5 – > 50.

В табл. 5 представлены размеры областей с разным уровнем риска $R_s I$ для рассматриваемой территории, полученных при использовании различных входных данных о сейсмической опасности региона: карты ОСР-97 и уточненные матрицы сотрясаемости, полученные в 2013 г. На региональной карте (см. рис. 4) появляются зоны, характеризующиеся аномальными значениями риска. В отдельных районах значения сейсмического риска становятся выше, но в целом по региону площадь зон с высокими значениями риска ниже по сравнению с оценками риска на карте, построенной с использованием ОСР-97 (см. табл. 5).

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА НА ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ С УЧЕТОМ ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ

В разделе приводятся примеры более детальных карт сейсмического риска $R_s I$ для городов Петропавловск-Камчатский и Б. Сочи. В качестве исходных данных об уровне сейсмической опасности использованы карты СМР территорий городов (М 1 : 10 000). Для верификации данных о паспортизации застройки городов и построения усредненных моделей застройки для типовых кварталов городов (процент зданий различного типа по шкале ММСК-86 для кварталов городов и их средние высоты) выполнены как наземное



Рис. 5. Фрагмент космоснимка для Адлерского района г. Б. Сочи, ул. Кирова.



Рис. 6. Новостройки г. Б. Сочи; класс уязвимости зданий С7–С9 по шкале ММСК-86.

обследование зданий, так и совместное дешифрирование космических снимков высокого разрешения (рис. 5) и веб-панорам (рис. 6), размещенных на сайте <https://maps.yandex.ru>. Опыт совместного применения веб-панорам и космических снимков показал высокую эффективность этих методов для уточнения данных о распределении

жилой и промышленной застройки и ее уязвимости. С учетом интересов конечных пользователей выполнялись как оценки индивидуального сейсмического риска, так и оценки последствий сценарийных землетрясений для наиболее опасных для города зон ВОЗ.

На рис. 7 показан пример карты сейсмического риска $R_{\Sigma 1}$ для г. Петропавловска-Камчатский. Наиболее опасные зоны ВОЗ для города [8], их характеристики и возможные оценки последствий сценарийных землетрясений приведены в табл. 6. (рис. 8). Анализ данных показывает, что наибольший риск для населения получается от сценарийного события из зоны AVS. Уровень риска от землетрясений из этой зоны может достигать $300 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$. Степень риска для населения от землетрясений из зоны AVS характеризуется как “высокая”. При этом уровне риска требуется обязательное выполнение мер по его снижению.

Максимальные потери населения могут составить при сценарийном землетрясении из зоны РЕТ (см. табл. 6): безвозвратные – 15 000 чел.; санитарные – 33 000 чел. С учетом факта, что максимальные риски для населения связаны с землетрясениями из зоны AVS, а максимальные потери населения связаны с зоной РЕТ, характеризующейся меньшим значением риска, можно сделать следующие выводы. Программы, планы и мероприятия по смягчению последствий землетрясений следует разрабатывать и реализовывать в два этапа. При перспективном планировании следует учитывать возможные максимальные потери населения: безвозвратные – 15 000 чел.; санитарные – 33 000 чел. В первую очередь, следует выполнять мероприятия, ориентированные на возможные потери: безвозвратные – 2 600 чел.; санитарные – 8 000 чел.

Работы по оценке сейсмического риска для г. Б. Сочи проводились с 2007 по 2014 г. На рис. 9

Таблица 6. Возможные социальные потери и значения $ICPR_{\Sigma 1}$ для населения г. Петропавловска-Камчатского от сценарийных событий в зонах ВОЗ (рис. 8)

Индекс зоны	M_{\max} Период повторяемости, годы	Риск $R_{\Sigma 1}$, 10^{-5} год^{-1}	Ожидаемые социальные потери	
			погибшие, чел.	раненые, чел.
PET	6.8–7.0; 3000–30000	1.0–8.0	7260–15460	16180–33120
VUL	6.8–7.0; 2000–20 000	1.0–10.0	5590–12860	12580–32310
FZ9	9.0–8.5; 100–500	8.0–50.0	44–290	250–1 320
FZ8	8.4–8.25; 50–500	10.0–45.0	220–810	720–3270
AVS	7.8–7.9; 30–100	30.0–300.0	850–2610	2450–8150
AVG	7.8–7.9; 300–3000	4.0–15.0	570–1760	1650–6330



Рис. 7. Фрагмент карты индивидуального сейсмического риска R_{i1} [10^{-5} год $^{-1}$] для населения г. Петропавловска-Камчатского, построенной с использованием карты СМР территории города; 1 – менее 1; 2 – 1-5; 3 – 5-10; 4 – более 10; 5 – расчеты не проводились.

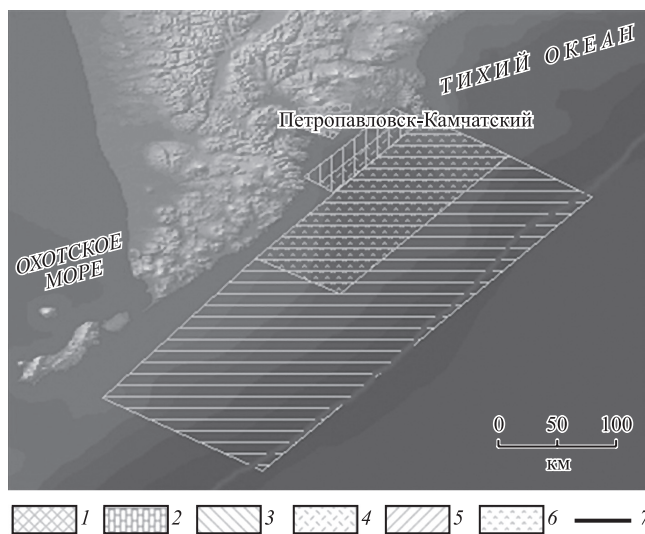


Рис. 8. Зоны ВОЗ [9]: 1 – VUL; 2 – PET; 3 – AVG; 4 – AVS; 5 – FZ9; 6 – FZ8; 7 – ось Тихоокеанского глубоководного жёлоба.



Рис. 9. Фрагмент карты индивидуального сейсмического риска R_s1 [10^{-5} год $^{-1}$] с учетом аварий на критически важных объектах, построенной с использованием карты СМР для г. Б. Сочи, $T = 500$ лет: 1 – менее 1, 2 – 1–5, 3 – 5–10, 4 – 10–20, 5 – 20–30, 6 – более 30, 7 – кварталы, на территории которых работы по СМР не проводились.

Таблица 7. Площади города Б. Сочи с различными уровнями риска

Диапазон риска, 10^{-5} год $^{-1}$	% площади, R_s2013 , $T = 500$ лет	% площади R_s2013 , $T = 1000$ лет	% площади R_s2007 , $T = 500$ лет
< 1	18.6	8.9	20.6
1–5	56.3	52.7	25.8
5–10	16.2	17.2	14.7
10–20	5.6	11.8	9.9
20–30	2.9	7.1	14.3
> 30	0.3	2.4	14.7

приведен фрагмент карты сейсмического риска R_s1 для населения г. Б. Сочи, построенной в 2014 г. с учетом возможных аварий на критически важных объектах в случае сильного землетрясения. Полученные оценки риска для разных кварталов города варьируют от значений менее $1.0 \cdot 10^{-5}$ год $^{-1}$ до весьма высоких, равных $30.0 \cdot 10^{-5}$ год $^{-1}$ и более.

Полученные значения сейсмического риска R_s1 , учитывающие аварии на критически важных объектах (рис. 9), увеличивают значения риска, полученные на предыдущих этапах исследований в 2007 и 2013 гг. (табл. 7), не более чем на 2%, что свидетельствует о незначительном вкладе техногенной составляющей.

Анализ результатов оценки индивидуального сейсмического риска для г. Б. Сочи, выполнявшейся на протяжении 7 лет, позволил сделать вывод о тенденции к снижению уровня риска до приемлемого для 30% территории города. Что обусловлено строительством сейсмостойких Олимпийских объектов и сносом ветхого жилья.

В г. Б. Сочи к 2032 г. прогнозируется рост численности постоянного населения на 29% с 402 тыс. чел. в 2008 г. до 518 тыс. чел., что при определенных условиях может привести к повышению уровня риска, например, в случае невыполнения мероприятий по усилению зданий на сейсмические воздействия. Пиковые значения риска могут увеличиваться в 1.5 раза.

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ОПЕРАТИВНОМ РЕЖИМЕ

На рис. 10 приведен пример оперативной оценки последствий землетрясения в Китае 21.07.2013 г. Надежность оценок последствий землетрясений в масштабе времени близком к реальному сильно зависит от многих факторов. В первую очередь, от погрешности в определении параметров землетрясений (координаты эпицентра, глубина очага, магнитуда и ее тип) службой срочных донесений ГС РАН и сейсмологических агентствами мира; от особенностей законов затухания макросейсмической интенсивности для рассматриваемого региона. Важный фактор также – достоверность региональных функций уязвимости элементов риска.

Для ранжирования влияния различных факторов они были объединены в три группы, связанные с 1) очаговыми параметрами, 2) макросейсмическим полем, 3) инженерными и социальными факторами уязвимости элементов риска. Для краткости изложения и удобства чтения перечисленным группам были присвоены краткие названия: “очаг”, “поле” и “уязвимость” (табл. 8).

Оценка влияния различных факторов на надежность оценок последствий землетрясений осуществлялась с помощью глобальной версии ГИС “Экстремум” на примере нескольких сильных событий последних лет в Китае, Пакистане, Италии и Непале. Исследования позволили сделать вывод, что применительно к современному состоянию средств и методов получения оперативной информации о параметрах землетрясения и уязвимости элементов риска, на надежность оценки потерь, в первую очередь, влияют ошибки в определении координат эпицентра, магнитуды и глубины очага (рис. 11).

Степень влияния этих факторов оценивается величиной чуть более 50%. Рейтинг этой группы факторов самый высокий. На втором месте по степени влияния – погрешности группы факторов, связанных с моделированием макросейсмического поля, степень влияния около 30%. На последнем месте – группа факторов, описывающих классы элементов риска и их уязвимость. Следует отметить, разрыв по степени влияния второй и третьей группы факторов не столь велик, но даже небольшой разницей в 10% нельзя пренебречь.

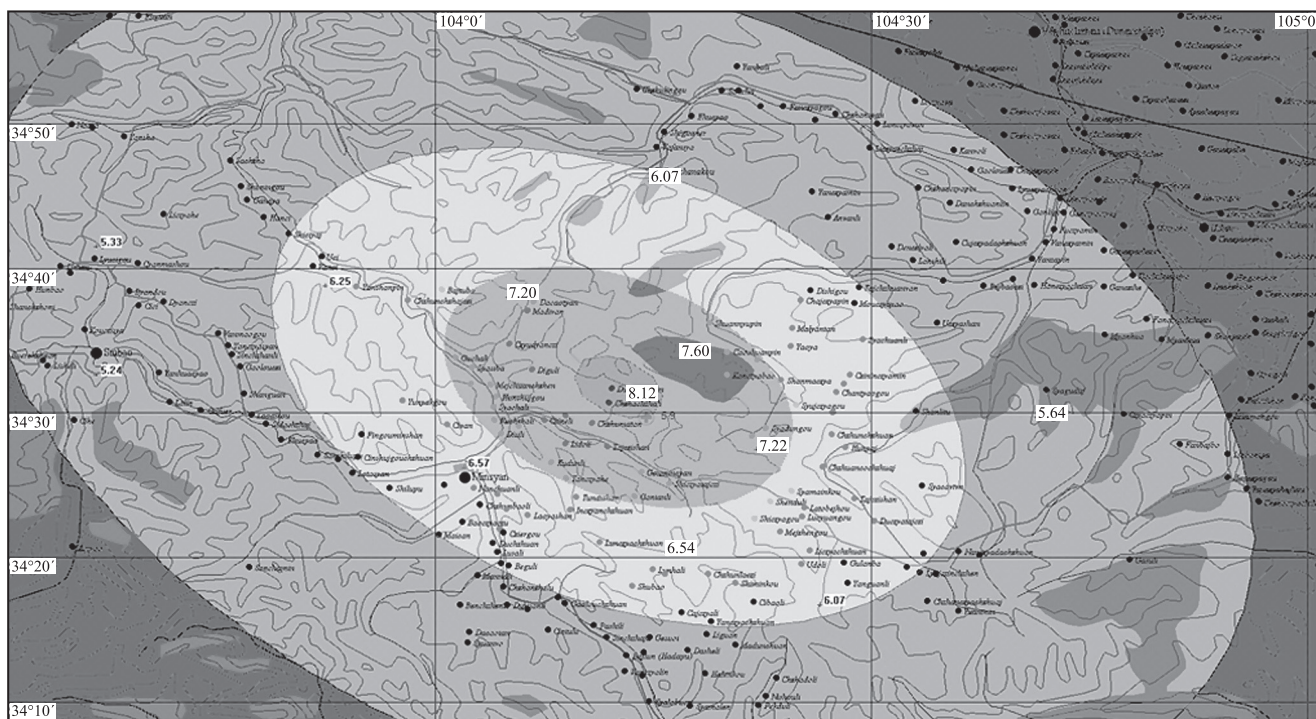


Рис. 10. Моделирование последствий землетрясения 21 июля 2013 г. в Китае: цифры – ожидаемые сотрясения в баллах шкалы MMSK-86.

Таблица 8. Факторы, влияющие на надежность оценок потерь

№	№ группы факторов и ее название	Сокращенное название факторов	Пояснение к сокращенному названию
1	1 очаг	местоположение	координаты эпицентра
2		магнитуда	магнитуда
3		глубина	глубина очага
4	2 поле	оси	отношение полуосей эллипса макросейсмического поля
5		затухание	региональные коэффициенты уравнения макросейсмического поля
6		ориентация	ориентация макросейсмического поля
7	3 уязвимость	модель населенного пункта	процентное соотношение зданий различных классов уязвимости в соответствии со шкалой MMSK-86
8		уязвимость классов	зависимости для оценки степени повреждения зданий (поражения людей) в случае различного сейсмического воздействия

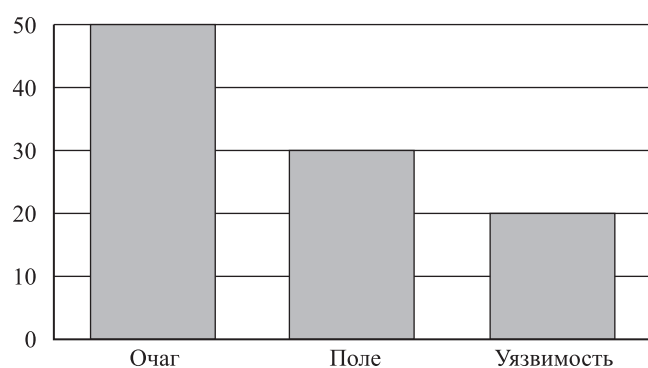


Рис. 11. Степень влияния погрешностей групп факторов на погрешность оценки потерь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье кратко описаны методические подходы к оценке сейсмического риска, приводятся примеры оценки и картирования риска на разных уровнях, в том числе в оперативном режиме на глобальном уровне.

Величина индивидуального сейсмического риска для населения на картах разного масштаба непосредственно связана со значениями прогнозируемой интенсивности землетрясений, ожидаемого интервала времени осуществления прогноза, а также уязвимостью элементов риска: населения, гражданской и промышленной застройки.

Надежность оценок сейсмического риска сильно зависит от параметров математических моделей, используемых в расчетах, и достоверности информации о распределении элементов риска, их уязвимости. При оперативных оценках потерь с помощью глобальной версии ГИС “Экстремум” наибольшее влияние на надежность оказывают ошибки в определении параметров землетрясений службами срочных донесений РФ и мира.

В дальнейшем предполагается развитие методических подходов, в том числе совершенствование моделей оценки интенсивности за счет применения компенсирующих неопределенность алгоритмов оценки параметров землетрясений, определенных службами срочных донесений РФ и мира.

Планируется разработка методики оценки индексов сейсмического риска, позволяющих оценить их изменчивость с учетом данных среднесрочного прогноза землетрясений, сезонных изменений численности населения, проживающего в сейсмоопасных районах и планируемого изменения качества застройки.

Одно из важных направлений дальнейших исследований в целях повышения достоверности оценок показателей риска – совершенствование базы знаний о последствиях сильных событий и разработка средств, обеспечивающих коллективный управляемый доступ к информации и функциям ее интерфейса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков ЧС в Российской Федерации. М.: ИПЦ “ДИК”, 2005. 224 с.
2. Комплект карт ОСР-97-А, В, С и другие материалы для Строительных норм и правил – СНиП “Строительство в сейсмических районах”. М.: ОИФЗ, 1998.
3. Ларионов В.И., Сущев С.П., Угаров А.Н., Фролова Н.И. Оценка сейсмического риска с применением ГИС-технологий // Природные опасности России. Т. 6: Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. фирма “КРУК”, 2003. С. 209–231.
4. Методика прогнозирования последствий землетрясений. М.: ВНИИ ГОЧС-ЦИЭКС–СЦ ИГЭ РАН, 2000. 27 с.
5. Осипов В.И., Фролова Н.И., Сущев С.П., Ларионов В.И. Оценка сейсмического и природного риска для населения и территорий Российской Федерации // Экстремальные природные явления и катастрофы: в 2 т. Т. 2: Геология урана, геоэкология, гляциология / Отв. ред. В.М. Котляков. М.: Изд-во “ПРОБЕЛ 2000”, 2011. С. 28–48.
6. Оценка сейсмической опасности и риска. Пособие для должностных лиц. М.: БСТС Центр, 1997. 54 с.
7. Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Овсяченко А.Н., Донцова Г.Ю., Родина С.Н., Кучай М.С. Опыт детального сейсмического районирования Северного Кавказа // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С. 38–42.
8. Соболев Г.А., Антикаев Ф.Ф., Шумилина Л.С., Гусев А.А. Сценарии сейсмических событий, разрушительных для урбанизированной территории вокруг Авачинской бухты. М.— Петропавловск-Камчатский: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
9. Сущев С.П., Ларионов В.И., Фролова Н.И. Оценка и управление сейсмическим риском с применением ГИС Экстремум // Матер. XV междунар. научно-практ. конф. “Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций”: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010. С. 327–345.
10. Шебалин Н.В., Ершов И.А., Шестоперов Г.С. и др. Улучшенный вариант шкалы сейсмической интенсивности (MMSK-86) на базе шкал MSK-64 и MCCC-73. М.: МССС, ИФЗ. 1986. 61 с.
11. Fournier d’Albe. An Approach to Earthquake Risk Management // Engineering Structures, 1982. V. 4. P. 145–152.
12. Frolova N., Larionov V., Bonnin J. Earthquake Casualties Estimation In Emergency Mode // Human Casualties in Earthquakes, Advances in Natural and Technological Hazards Research. Springer Science, 2011. P. 107–124.
13. Frolova N., Larionov V., Sushev S., Bonnin J. Loss estimations caused by earthquakes and secondary technological hazards // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. № 11. P. 3025–3033.
14. Frolova N., Larionov V., Bonnin J., Ugarov A. Seismic Risk Cartographic Visualization For Crisis Management // Geography, Environment, Sustainability. 2014. V. 7. N 4. P. 4–27.
15. Karnik V., Algermissen S. T. Seismic Zoning: The Assessment and Mitigation of Earthquake Risk, UNESCO, Paris, 1978. P. 11–47.
16. Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options. A Manual for Policy Makers and Planners. UNDRR. New York: UN, 1991. 164 p.
17. Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management, 2010 // <http://register.consilium.europa.eu/pdf/en/10/st17/st17833.en10.pdf>
18. UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction, 2009 // <http://www.unisdr.org/eng/terminology/UNISDR-terminology-2009-eng.pdf>.

REFERENCES

1. Atlas prirodnykh i tekhnogenykh opasnostei i riskov ChS v Rossijskoi Federatsii [Atlas of natural and technogenic hazards and risks of emergency situations in Russian Federation]. Moscow, Publ. Center “DIK”, 2005, 224 p. (in Russian).
2. Komplekt kart OSR-97-A, B, C i drugie materialy dlya Stroitel’nykh norm i pravil – SNIp “Stroitel’stvo v seismicheskikh raionakh” [Set of maps OSR-97-A, B, C and other materials for construction rules and standards – SNIp “Construction in earthquake-prone areas”]. Moscow, OIFZ, 1998 (in Russian).
3. Larionov, V.I., Suchshev, S.P., Ugarov, A.N., Frolova, N.I. [Seismic risk assessment using GIS-technologies]. Prirodnye opasnosti Rossii, t.6: Otsenka i upravlenie prirodnyimi riskami. [Natural hazards in Russia, vol. 6 “Natural risk assessment and management”]. Ragozin, A.L., Ed. Moscow, KRUK Publ., 2003, pp. 209–231 (in Russian).
4. Metodika prognozirovaniya posledstviy zemletryaseni [Methods of earthquake consequences forecast]. Moscow, VNI GOChS – ESRC – SC IGE RAS, 2000, 27 p. (in Russian).
5. Osipov, V.I., Frolova, N.I., Sushchev, S.P., Larionov, V.I. [Seismic and natural risk assessment for the population and territories of Russian Federation]. Ekstremalnye prirodnye yavleniya i katastrofy. T. 2 “Geologiya urana, geoekologiya, glyatsiologiya” [Extreme natural phenomena and catastrophes. Vol. 2. Geology of uranium, geoecology, and glaciology]. Kotlyakov, V.M. Ed. Moscow, PROBEL 2000 Publ., 2011, pp. 8–48 (in Russian).
6. Otsenka seismicheskoi opasnosti i riska. Posobie dlya dolzhnostnykh lits. [Seismic hazard and risk assessment. Guidelines for decision makers. Sobolev, G.A. Ed., Moscow, BSTS Tsentr Publ., 1997, 54 p. (in Russian)
7. Rogozhin, E.A., Lutikov, A.I., Ovsyuchenko, A.N., Dontsova, G.Yu., Rodina S.N., Kuchai M.S. Opyt detal’nogo seismicheskogo raionirovaniya Severnogo

- Kavkaza [Experience in detailed seismic zoning of North Caucasus]. *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2013, no. 4, pp. 38–42 (in Russian).
8. Sobolev, G.A., Aptikaev, F.F., Shumilina, L.S., Gusev, A.A. *Stsenarii seismicheskikh sobytii, razrushitelnykh dlya urbanizirovannoi territorii vokrug Avachinskoi bukhty*. [Scenarios of damaging seismic events for urban areas around Avachin Bay]. Moscow-Petropavlovsk-Kamchatsky, OIFZ RAN, 1999, 57 p. (in Russian).
 9. Sushchev, S.P., Larionov, V.I., Frolova, N.I. [Seismic risk assessment and management with GIS Extremum application]. *Mater. XV mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Problemy zashchity naseleniya i territorii ot chrezvychainykh situatsii* [Proc. XV international scientific conference "Problems of population and territory protection against emergencies"]. Moscow, FGU VNII GOChS, 2010, pp. 327–345 (in Russian).
 10. Shebalin, N.V., Ershov, I.A., Shestoporov, G.S., et al. *Uluchshennyi variant shkaly seiismicheskoi intensivnosti (MMSK-86) na baze shkal MSK-64 i MSSSS-73*. [Improved version of seismic intensity scale (MMSK-86) based on scales MSK-64 and MSSSS-73]. Moscow. MSSS-IFZ. 1986, 61 p. (in Russian).
 11. Fournier d'Albe. An Approach to Earthquake Risk Management. *Engineering Structures*, 1982, vol. 4, pp. 145–152.
 12. Frolova, N., Larionov, V., Bonnin, J. Earthquake Casualties Estimation In Emergency Mode. *Human casualties in earthquakes, advances in natural and technological hazards research*. Springer Science, 2011, pp. 107–124.
 13. Frolova, N., Larionov, V., Suschev, S., Bonnin, J. Loss estimations caused by earthquakes and secondary technological hazards. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2011, no. 11, pp. 3025–3033.
 14. Frolova, N., Larionov, V., Bonnin, J., Ugarov, A. Seismic risk cartographic visualization for crisis management. *Geography, Environment, Sustainability*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 4–27.
 15. Karnik, V., Algermissen, S.T. Seismic zoning: the assessment and mitigation of earthquake risk, UNESCO, Paris, 1978, pp. 11–47.
 16. Mitigating natural disasters: phenomena, effects and options. A manual for policy makers and planners. UNDRO. New York: UN, 1991, 164 p.
 17. Risk assessment and mapping guidelines for disaster management, 2010. <http://register.consilium.europa.eu/pdf/en/10/st17/st17833.en10.pdf>
 18. UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction, 2009. <http://www.unisdr.org/eng/terminology/UNISDR-terminology-2009-eng.pdf>.

SEISMIC RISK ASSESSMENT

V.I. Larionov*, N.I. Frolova*, A.N. Ugarov*, S.P. Sushchev**, M.A. Kozlov**,
N.A. Malaeva*, T.V. Barskaya*

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: frolova@comail.ru

**Extreme Situations Research Centre, Vyatskaya ul. 35, Moscow, 127015 Russia.
E-mail: esrc@esrc.ru

Seismic risk assessment and mapping at different levels are the first important steps in implementation of the strategy to reduce social and economic losses caused by earthquakes. Information about the possible damage and the expected number of casualties just after the event is also very important for taking the decision on search and rescue operations, as well as on rendering humanitarian assistance.

This paper addresses the methodological issues of earthquake loss estimations with GIS technology application. Examples of seismic risk assessment and mapping for the territory of the Russian Federation at different levels are given and the results of near real time simulation of the earthquake July 21, 2013 in China simulation are shown.

The paper analyzes the influence of the input data and inaccuracies of mathematical models on the reliability of seismic risk assessment before and just after earthquakes.

Key words: simulation, earthquake impact, seismic risk, maps, GIS technology, reliability of loss assessment.