

УДК 624.131.1:551.252

## Оперативное моделирование последствий ощутимых землетрясений

© 2025 г. Н.И. Фролова<sup>1</sup>, Н.С. Малаева<sup>1,2</sup>, С.П. Суцев<sup>3</sup>, А.Н. Угаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИГЭ РАН, г. Москва, Россия; <sup>2</sup>ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), г. Москва, Россия;

<sup>3</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 24.04.2025 г.

**Аннотация.** Представлены результаты оперативного расчёта последствий ощутимого землетрясения 24 января 2024 г. с  $m_b=4.3$  вблизи г. Краснодара. Расчёты возможных интенсивностей сотрясений и ущерба выполнены с помощью имитационных моделей геоинформационной системы (ГИС) «Экстремум». Использование ранее откалиброванных моделей затухания сейсмической интенсивности позволило получить хорошее согласование расчётных и наблюдаемых значений  $I=4$  балла по шкале MSK-64. Завышение расчётных значений  $I=3$  балла может быть связано как с ограниченностью данных наблюдений, так и с недостатками калибровки для низких значений интенсивности макросейсмического поля. Полученные оперативные оценки последствий ощутимых землетрясений могут быть использованы для информационного наполнения «Автоматизированной информационно-управляющей системы Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (АИУС РСЧС), используемой для подготовки решения руководителями органов исполнительной власти при обеспечении безопасности населения.

**Ключевые слова:** ощутимые землетрясения, оперативная оценка последствий, ГИС «Экстремум», Краснодар.

**Для цитирования:** Фролова Н.И., Малаева Н.С., Суцев С.П., Угаров А.Н. Оперативное моделирование последствий ощутимых землетрясений // Российский сейсмологический журнал. — 2025. — Т. 7, № 2. — С. 23–40. — DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.2.02>. — EDN: IUDLHC

### Введение

Быстрая оценка воздействия землетрясения на население является важным шагом управления спасательной операцией. Она определяет перечень необходимых мер и последовательность их реализации в случае чрезвычайных ситуаций. Предоставляемая в первые минуты после землетрясения усреднённая и обобщённая информация о возможных социальных и экономических последствиях позволяет принять обоснованное решение о применении мер экстренного реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС) или их отмене.

Существующие в настоящее время системы оперативной оценки воздействий землетрясений основываются как на использовании имитационных моделей, так и на возможностях большого числа краудсорсинговых платформ [Bossu et al., 2017; Contreras et al., 2022; Fallou et al., 2022; Lilienkamp et al., 2023].

Наиболее известным и достоверным источником информации, формируемым в первые минуты и часы после землетрясений, является система Геологической службы США PAGER, предоставляющая количественную оценку социальных и экономических потерь. Для оценки потерь моделируется затухание сейсмической интенсивности, вычисляется распределение ожидаемой интенсивности, производится оценка количества жителей в зонах различной интенсивности на основе информации о плотности населения (<https://earthquake.usgs.gov/data/pager>). Система GDACS предназначена для мониторинга сейсмической ситуации в режиме, близком к реальному времени, и оценки предполагаемого числа жителей в пострадавшей зоне, на основе данных о плотности населения (<https://gdacs.org>), [De Groeve et al., 2006; 2008].

Важными источниками информации об оперативной оценке последствий землетрясений в первые минуты и часы после события являются

краудсорсинговые платформы «Did you feel», поддерживаемые Геологической службой США (<https://earthquake.usgs.gov/data/dyfi>) и Европейским Средиземноморским сейсмологическим центром ([https://emsc.eu/Earthquake\\_information/post](https://emsc.eu/Earthquake_information/post)), анализирующие информацию об откликах жителей об их ощущениях и наблюдениях.

Последние годы в рамках проекта «Глобальная модель землетрясений» (GEM), который является государственно-частным партнёрством, инициированным Глобальным научным форумом Организации экономического сотрудничества и развития, членом которой Россия не является, разработано и активно продвигается программное обеспечение OpenQuake-engine для расчётов сейсмической опасности и риска (<https://www.globalquakemodel.org>), [Global ..., 2018]. Команда GEM недавно представила Real-Time Loss Tools, основанные на программном обеспечении OpenQuake-engine, которые позволяют оценивать ущерб и потери из-за последовательностей землетрясений с учётом накопления ущерба и перемещения людей, находящихся в здании. В публикации [Nievas et al., 2025] приведён пример ретроспективной оценки ущерба и потерь в результате событий турецко-сирийской последовательности 2023 года.

В Российской Федерации в рамках Национального центра управления кризисными ситуациями (НЦУКС) МЧС России создана Автоматизированная информационная управляющая система (АИУС), которая позволяет обеспечить значительное повышение качества принимаемых решений за счёт роста надёжности результатов оперативного моделирования последствий землетрясений, характеризующих возможную обстановку. Для прогноза последствий используются методы математического моделирования, позволяющие оценить разнообразные параметры обстановки. Чаще всего определяются возможное распределение сейсмической интенсивности, средние степени повреждения застройки, социальные и экономические показатели сейсмического риска.

Одной из важнейших составных частей АИУС является подсистема оперативно-аналитической работы. Оценка параметров обстановки включена в состав функций этой подсистемы как основная. При планировании спасательных операций или превентивных мероприятий подсистема позволяет прогнозировать параметры обстановки и обеспечивает повышение эффективности управления силами и средствами Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС).

Важной особенностью АИУС являются средства информационной интеграции, объединённые в рамках подсистемы межведомственного взаимодействия, функционирующей на основе протоколов и соглашений об информационном обмене. Формализация обмена и соответствующие программные средства позволяют пользователям в критических ситуациях оперативно получать от ведомств необходимые данные по каналам информационно-коммуникационной сети для того, чтобы использовать их для оценки параметров обстановки и риска.

При оценке обстановки в зоне влияния сейсмического события межведомственное взаимодействие осуществляется со Службой срочных донесений Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ССД ФИЦ ЕГС РАН), предоставляющей данные о параметрах землетрясений (<http://www.gsras.ru/new/ssd.htm>).

Ранее выполненные исследования [Ларионов и др., 2017; Фролова и др., 2016; Фролова, Угаров, 2018] позволили выявить факторы, влияющие на надёжность оперативных оценок потерь от землетрясений и пути минимизации негативного влияния этих факторов. К наиболее значимым факторам отнесены погрешности в определении параметров землетрясений, предоставляемых ССД ФИЦ ЕГС РАН и сейсмологическими агентствами мира: координат эпицентра, глубины очага, магнитуды и её типа. Кроме того, на надёжность влияет использование обобщённых для больших территорий коэффициентов закона затухания макросейсмической интенсивности, построенного относительно магнитуды по поверхностной волне, которая часто не определяется в оперативном режиме по инструментальным данным, а пересчитывается из значений других типов магнитуд.

Условность математических зависимостей, используемых при моделировании сейсмической интенсивности, степеней повреждений зданий и сооружений, а также ущерба здоровью людей, вносит дополнительные погрешности в оценку возможных последствий. Для минимизации влияния перечисленных факторов ранее была выполнена калибровка моделей с использованием баз данных о последствиях прошлых событий [Фролова и др., 2019].

Все организации, поставляющие информацию в НЦУКС (корреспонденты центра управления), должны обеспечить определённый уровень качества своей информационной продукции. Для этого они развивают свои сети наблюдения за обстановкой, средства измерения

и обработки данных об источниках опасности, математические модели, позволяющие прогнозировать уровни опасности и риска, качество сервисов, с помощью которых данные передаются в АИУС.

В статье приводятся результаты оперативного расчёта последствий ощутимого землетрясения 24 января 2024 г. с  $m_b=4.3$  вблизи г. Краснодара. В качестве исходных данных используются параметры землетрясения, определённые ССД ФИЦ ЕГС РАН. Расчёт возможных сейсмических интенсивностей и степеней повреждения застройки выполнен с помощью имитационных моделей системы «Экстремум», созданной при участии авторов статьи. Достигнутая сходимость расчётных и наблюдаемых показателей получена за счёт ранее выполненной совместно с ФИЦ ЕГС РАН калибровки моделей для учёта региональных особенностей затухания интенсивности.

**Краткая характеристика региона  
и исходные данные для моделирования  
последствий землетрясения 24 января 2024 г.  
с  $m_b=4.3$  вблизи Краснодара средствами АИУС**

В целом территория Краснодарского края на современном этапе характеризуется умеренным уровнем сейсмичности, землетрясения с интенсивностью 7–8 баллов известны здесь в XIX–XX вв. Самые значительные из них: 10 марта 1834 г. с  $M=3.5$ ,  $I_0=6$ –7 баллов; 18 августа 1896 г. с  $M=4.8$ ,  $I_0=7$  баллов; 19 апреля 1926 г. с  $M=5.3$ ,  $I_0=7$ –8 баллов. Краснодарский край – самый сейсмоактивный в Южном федеральном

округе Российской Федерации, на территории края в рамках работ по общему сейсмическому районированию (ОСР) и детальному сейсмическому районированию (ДСР) выделены зоны возможных очагов землетрясений (зоны ВОЗ) с  $M_{\max}=5.0, 5.5, 6.0$  и 7.0.

Актуальность исследования определяется активизацией сейсмичности в последние годы на территории Западного Предкавказья по данным регистрации сетью ФИЦ ЕГС РАН сейсмических событий с магнитудами  $M \geq 3.0$ . Землетрясения 24 января 2024 г. с  $m_b=4.3$ ,  $I_0=5$  баллов вблизи Краснодара и 10 апреля 2024 г. в районе г. Белореченска в Краснодарском крае с  $M_w=3.9$  вызвали большой резонанс у населения.

По данным ГУ МЧС России по Краснодарскому краю (КК), подземные толчки от события 24 января 2024 г. ощущались интенсивностью  $I=4$  балла в Краснодаре, Горячем Ключе и в Северском районе КК. Были организованы мониторинговые группы муниципальных образований в населённых пунктах для проверки информации о возможном повреждении зданий и сооружений. В СМИ и соцсетях КК появились сообщения о странных толчках, жители сообщали о поведении предметов быта, о раскачивании люстр и дребезжании посуды в шкафах на верхних этажах зданий. Жители обращались в экстренную службу «112». МЧС призывало жителей и гостей Краснодарского края соблюдать спокойствие и не поддаваться панике, в отдельных районах Краснодара проводилась эвакуация людей на улицу из офисных зданий (рис. 1).

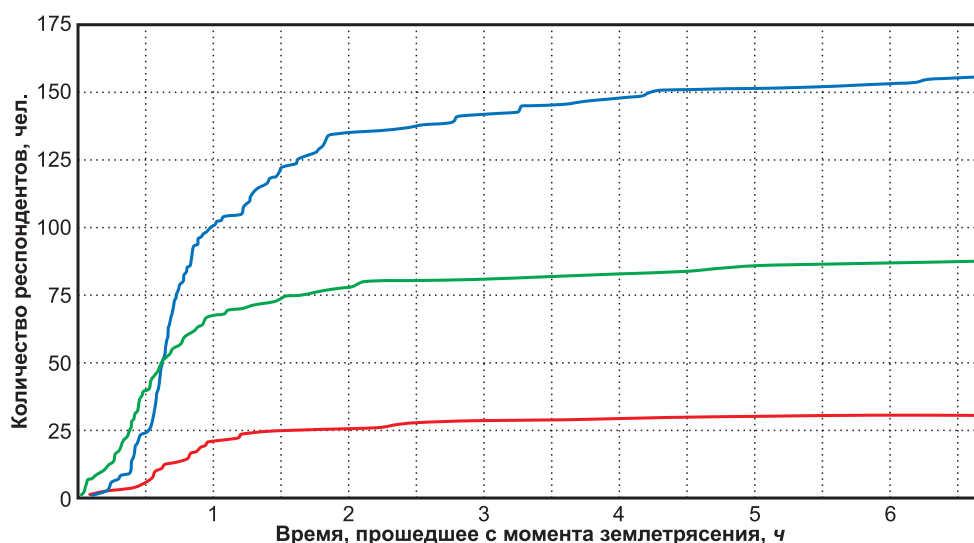


**Рис. 1.** Эвакуация людей из офисных зданий в Краснодаре во время землетрясения 24 января 2024 г.  
(<https://bloknot-krasnodar.ru/news/v-krasnodare-iz-za-zemletryaseniya-evakuirovali-ne-1693500>;  
<https://www.kommersant.ru/doc/6466608>)

На сайт Европейского Средиземноморского сейсмологического центра EMSC ([https://www.emsc-csem.org/Earthquake\\_information/earthquake\\_map.php?id=1610302](https://www.emsc-csem.org/Earthquake_information/earthquake_map.php?id=1610302)) поступило 286 сообщений от жителей КК. В основном жители КК использовали мобильную версию сайта (синяя линия на рис. 2) для размещения информации об ощущениях на сайте EMSC, основной объем информации поступил в первые 1.5-2 часа после события. На втором месте – мобильное приложение LastQuake, которое позволяет получать

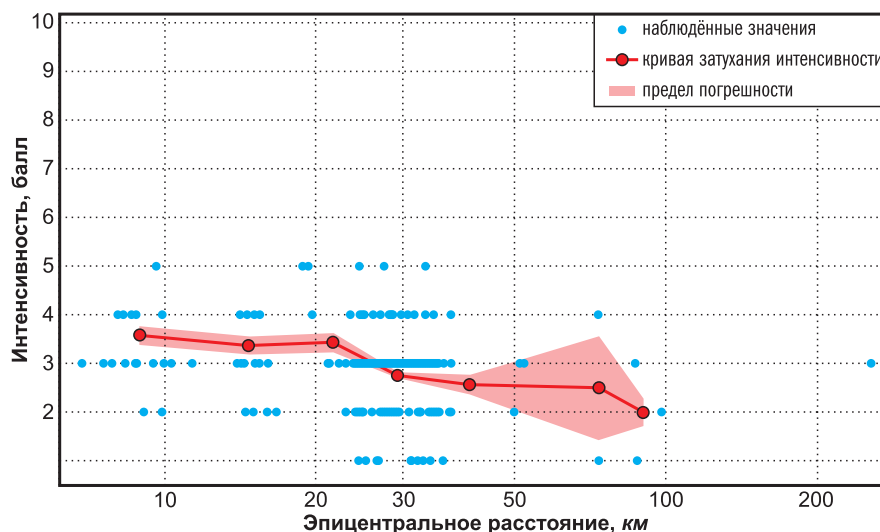
информацию о землетрясениях по всему миру или отправлять комментарии в случае внезапного толчка.

На рис. 3 показано распределение наблюдаемой интенсивности  $I_{\text{набл}}$  в зависимости от эпицентрального расстояния, построенное сотрудниками EMSC на основе анализа полученных откликов. Оценка погрешностей составляет 0.2 балла в ближней зоне до 40 км и достигает 1 балла на расстояниях, превышающих 50 км (табл. 1).



**Рис. 2.** Динамика откликов жителей КК об ощущениях землетрясения 24 января 2024 г., размещённых на сайте EMSC.

Зелёная линия – мобильное приложение LastQuake; синяя линия – мобильная версия сайта EMSC; красная линия – сайт EMSC-CSEM



**Рис. 3.** Обобщённая зависимость интенсивности от эпицентрального расстояния на основе анализа данных об откликах населения КК на сайте EMSC ([https://emsc.eu/Earthquake\\_information/post](https://emsc.eu/Earthquake_information/post)).

Голубые точки – необработанные значения интенсивности; красный кружок с линией – откорректированная кривая интенсивности; розовый цвет – диапазон неопределённости

**Таблица 1.** Макросейсмические сведения о землетрясении 24 января 2024 г. в Краснодарском крае по данным EMSC

| $\Delta$ , км | $I$ , балл | Количество респондентов, чел. | Сотрясаемость | Повреждения | Количество жителей в НП, чел. | Населённый пункт |
|---------------|------------|-------------------------------|---------------|-------------|-------------------------------|------------------|
| 0–7           | $\geq 3.6$ | 0                             | слабая        | нет         | 5273                          | —                |
| 7–11          | 3.6        | 18                            | слабая        | нет         | 37194                         | Северская        |
| 11–16         | 3.4        | 17                            | слабая        | нет         | 62440                         | Ильский          |
| 16–24         | 3.4        | 18                            | слабая        | нет         | 137108                        | Елизаветинская   |
| 24–35         | 2.8        | 211                           | слабая        | нет         | 670094                        | Краснодар        |
| 35–53         | 2.6        | 14                            | слабая        | нет         | 483694                        | Крымск           |
| 53–78         | 2.5        | 2                             | слабая        | нет         | 828283                        | Новороссийск     |
| 78–116        | 2.0        | 5                             | слабая        | нет         | 1088465                       | Туапсе           |

Для моделирования последствий землетрясения 24 января 2024 г. были использованы параметры события, определённые ССД ФИЦ ЕГС РАН:  $t_0=11:19:26$ ,  $\varphi=44.86^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=38.60^\circ\text{E}$ ,  $h=5$  км,  $m_b=4.3$ . Моделирование распределения сейсмических интенсивностей и потерь выполнено с применением имитационных моделей ГИС «Экстремум» для ориентации эллиптических изосейст вдоль разломов [Трифонов и др., 2002] и коэффициента сжатия или отношения полуосей изосейст высших баллов  $k=2.0$ . Использованы ранее полученные результаты совместных исследований с ФИЦ ЕГС РАН по калибровке уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина [Шебалин, 1968; 1977] на основе анализа макросейсмических данных о 21 ощутимом и сильном событии в КК за период с 1799 г. по настоящее время [Габсатрова и др., 2016; Никонов, 1997; 2015].

#### Краткое описание математических моделей ГИС «Экстремум»

Математические модели ГИС «Экстремум» основаны на общепринятой концепции оценки последствий землетрясений и показателей сейсмического риска [Оценка ..., 1997; Методика ..., 2000], принятой и описанной в руководствах ООН и трудах международных и европейских конференций по инженерной сейсмологии и сейсмостойкому строительству [Fournier d'Albe, 1982; Karnik, 1984; Karnik et al., 1978; Mitigating ..., 1991; Risk ..., 2010; UNISDR ..., 2009], а также широко используемой для реализации Сендайской рамочной программы (<https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>), предусматривающей совершенствование научных подходов оценки риска природных катастроф и внедрение их в практику уменьшения риска в 2015–2030 гг.

Согласно этой концепции, сейсмический риск определяется как суперпозиция сейсмической опасности и уязвимости различных элементов риска, в первую очередь зданий и элементов инфраструктуры. Основной причиной социальных и экономических потерь при землетрясениях являются разрушенные или повреждённые здания, а также вторичные аварии на различных элементах линий жизнеобеспечения и опасных промышленных объектах.

В ГИС «Экстремум» для оценки последствий только что произошедших землетрясений в оперативном режиме или от сценарных событий на первом этапе моделируется возможное распределение сейсмической интенсивности с использованием уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина [Шебалин, 1968; 1977]:

$$I = bM - v \lg r + c, \quad (1)$$

где  $r$  — гипоцентрально расстояние, определяемое по формуле:  $r = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$ ,  $\Delta$  — эпицентрально расстояние, км;  $h$  — глубина очага, км;  $M$  — магнитуда землетрясения;  $b$ ,  $c$ ,  $v$  — региональные коэффициенты уравнения макросейсмического поля.

На следующем этапе определяется вероятность наступления  $i$ -й степени повреждения здания  $P_{Bi}(I)$  в зависимости от сейсмической интенсивности  $I$ , которой может быть подвержена застройка разного типа в населённом пункте, классифицированная по шкале MMSK-86 [Шебалин и др., 1986]:

— 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 лёгкими перекрытиями; здания из жжёного 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 расчётной сейсмичности 7, 8 и 9 баллов соответственно.

Расчёт вероятности гибели и ранения людей  $P_k(I)$  в зданиях  $k$ -го типа, классифицированных по шкале MMSK-86, при землетрясении интенсивности  $I$  проводится для каждого типа зданий по формуле:

$$P_k(I) = \sum_{i=1}^n P_{Bi}(I) P(C_j | B_i), \quad (2)$$

где  $P_{Bi}(I)$  – вероятность наступления  $i$ -й степени повреждения здания при заданном значении интенсивности землетрясения  $I$ ;  $P(C_j | B_i)$  – вероятность получения поражения людьми  $j$ -й степени (гибели, ранения разной степени тяжести, потери имущества) при условии, что наступила  $i$ -я степень повреждения здания;  $n$  – рассматриваемое число степеней повреждения зданий.

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

$$M(N) = \sum_{j=1}^n \int_{S_c} \int_0^{24} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P_{Cj}(I) \cdot f(x, y, I) \cdot \Psi_j(x, y) \cdot f(t) dI dt dx dy, \quad (3)$$

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

Математические модели ГИС «Экстремум» регулярно калибруются с использованием данных о прошлых сильных и ощутимых землетрясениях в регионе для повышения надёжности результатов моделирования ущерба и потерь.

### Результаты моделирования последствий землетрясения 24 января 2024 г.

В разделе приводятся результаты моделирования последствий землетрясения на региональном и городском уровнях. На рис. 4 значками разного цвета показаны населённые пункты, размер значка соответствует численности населения, цвет значка – средней степени повреждения застройки в населённом пункте. Расчёт возможной интенсивности сотрясений был ограничен  $I_{\min} = 3$  балла. Застройка в 1% населённых пунктов на рассматриваемой в расчётах территории может получить средние оценки  $d_{\text{ср}} = 1$ . Для остальных населённых пунктов, расположенных на ограниченной расчётной территории, получены средние степени повреждений застройки  $d_{\text{ср}} = 0$ . Для приведённых на сайте EMSC населённых пунктов Ильский и Северская получены оценки  $d_{\text{ср}} = 1$ , для Краснодара, Елизаветинской, Крымска, Новороссийска и Туапсе получены оценки  $d_{\text{ср}} = 0$ .

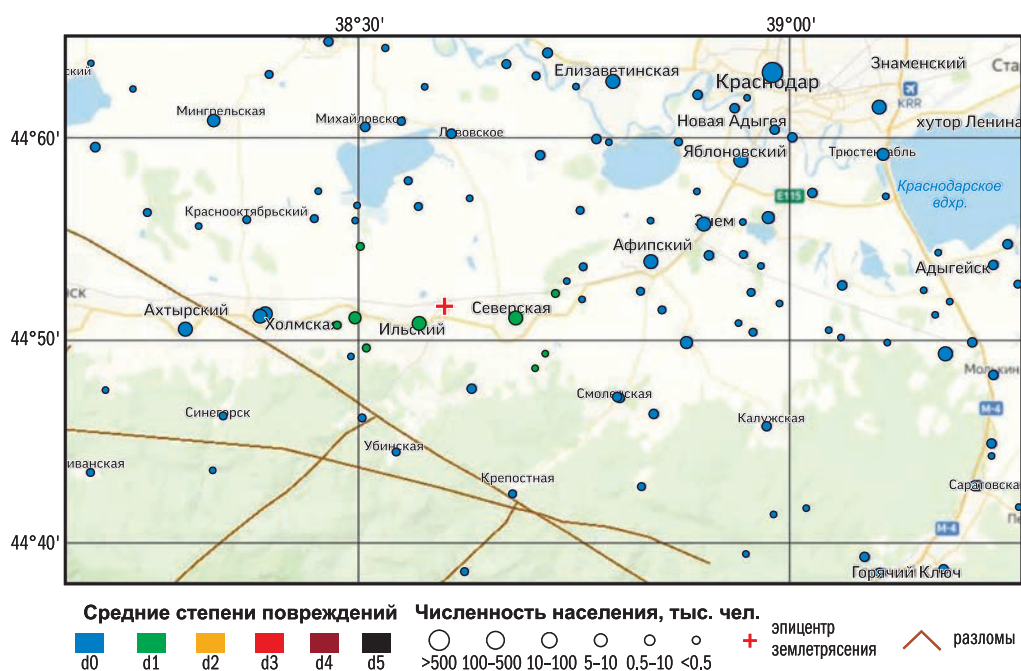


Рис. 4. Результаты моделирования последствий землетрясения 24 января 2024 г. с применением ГИС «Экстремум»

Выполнено сравнение расчётных значений интенсивностей  $I_{\text{расч}}$  с наблюдаемыми значениями  $I_{\text{набл}}$  по публикации [Зверева, Клянчин, 2024] (табл. 2).

Наибольшее расхождение между расчётными  $I_{\text{расч}}$  и наблюдаемыми  $I_{\text{набл}}$  значениями интенсивности до 2 баллов получено на эпицентральных расстояниях менее 10 км. В этом диапазоне расстояний наибольшие погрешности в определении расчётных значений интенсивности  $I_{\text{расч}}$  связаны с глубиной очага. Средняя глубина калибровочной выборки землетрясений составила  $h=12$  км, при расчёте принималась глубина  $h=5$  км. Подобное расхождение глубин в эпицентральной зоне может привести к завышению расчётной интенсивности на один балл и более. С увеличением расстояния от эпицентра погрешности в определении интенсивности падают до одного балла и менее. Минимальное откло-

нение расчётной интенсивности  $I_{\text{расч}}$  от наблюдаемой  $I_{\text{набл}}$  получено для диапазона расстояний 25–30 км.

Выполнено сравнение расчётных значений интенсивностей  $I_{\text{расч}}$  со средними значениями  $I_{\text{EMSC}}$ , оценёнными по окликам жителей на сайте EMSC (рис. 3, табл. 3).

Расчётные значения  $I_{\text{расч}}$  значительно превышают оценки, полученные по откликам жителей на сайте EMSC. Наибольшее расхождение ( $\Delta I=2.4$  балла) получено для населённого пункта Северская, наименьшее – для Новороссийска ( $\Delta I=0.5$  балла). Для Краснодара расхождение расчётных  $I_{\text{расч}}$  и наблюдаемых  $I_{\text{набл}}$  значений составило  $\Delta I=1.2$  балла.

Полученные для Краснодара оценки позволяют провести анализ расхождения наблюдаемой  $I_{\text{набл}}$  и расчётной интенсивности  $I_{\text{расч}}$  на территории города.

Таблица 2. Сравнение расчётных и наблюдаемых интенсивностей по [Зверева, Клянчин, 2024]

| Название населённого пункта | $\varphi$ , °N | $\lambda$ , °E | Количество респондентов, $N$ | $\Delta$ , км | $I_{\text{набл}}$ , балл | $I_{\text{расч}}$ , балл | $\Delta I$ , балл |
|-----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| Смоленская                  | 44.79          | 38.80          | 8                            | 12            | 5                        | 5                        | 1                 |
| Северская                   | 44.85          | 38.68          | 12                           | 4             | 4–5                      | 6                        | 1–2               |
| Афипский                    | 44.90          | 38.84          | 13                           | 8             | 4                        | 6                        | 2                 |
| Новодмитриевская            | 44.83          | 38.88          | 5                            | 12            | 4                        | 6                        | 2                 |
| Азовская                    | 44.79          | 38.63          | 2                            | 13            | 4                        | 5                        | 1                 |
| Энем                        | 44.90          | 38.91          | 2                            | 12            | 4                        | 5                        | 1                 |
| Елизаветинская              | 45.05          | 38.80          | 6                            | 19            | 4                        | 4                        | 0                 |
| Яблоновский                 | 44.99          | 38.94          | 6                            | 19            | 4                        | 5                        | 1                 |
| Краснодар                   | 45.04          | 38.98          | 226                          | 24            | 3–4                      | 4                        | 0–1               |
| Ахтырский                   | 44.85          | 38.30          | 1                            | 30            | 3–4                      | 4                        | 0–1               |
| Адыгейск                    | 44.88          | 39.19          | 5                            | 32            | 3–4                      | 4                        | 0–1               |
| Абинск                      | 44.87          | 38.26          | 1                            | 32            | 3                        | 4                        | 1                 |
| Динская                     | 45.22          | 39.23          | 2                            | 46            | 2                        | 3                        | 1                 |
| Новороссийск                | 44.72          | 37.77          | 2                            | 72            | 2                        | 3                        | 1                 |
| Берёзовый                   | 45.15          | 39.00          | 1                            | 34            | 0                        | 4                        | 4                 |

Таблица 3. Сравнение расчётной интенсивности  $I_{\text{расч}}$  с оценками интенсивности по откликам на сайте EMSC

| Название населённого пункта | $\varphi$ , °N | $\lambda$ , °E | Количество респондентов, $N$ | $\Delta$ , км | $I_{\text{EMSC}}$ , балл | $I_{\text{расч}}$ , балл | $\Delta I$ , балл |
|-----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| Северская                   | 44.85          | 38.68          | 18                           | 7–11          | 3.6                      | 6                        | 2.4               |
| Ильский                     | 38.57          | 44.85          | 17                           | 11–16         | 3.4                      | 5                        | 1.6               |
| Елизаветинская              | 45.05          | 38.80          | 18                           | 16–24         | 3.4                      | 4                        | 0.6               |
| Краснодар                   | 45.04          | 38.98          | 211                          | 24–35         | 2.8                      | 4                        | 1.2               |
| Крымск                      | 37.99          | 44.93          | 14                           | 35–53         | 2.6                      | 4                        | 1.4               |
| Новороссийск                | 44.72          | 37.77          | 2                            | 53–78         | 2.5                      | 3                        | 0.5               |
| Туапсе                      | 45.15          | 39.00          | 5                            | 78–116        | 2.0                      | 4                        | 2                 |

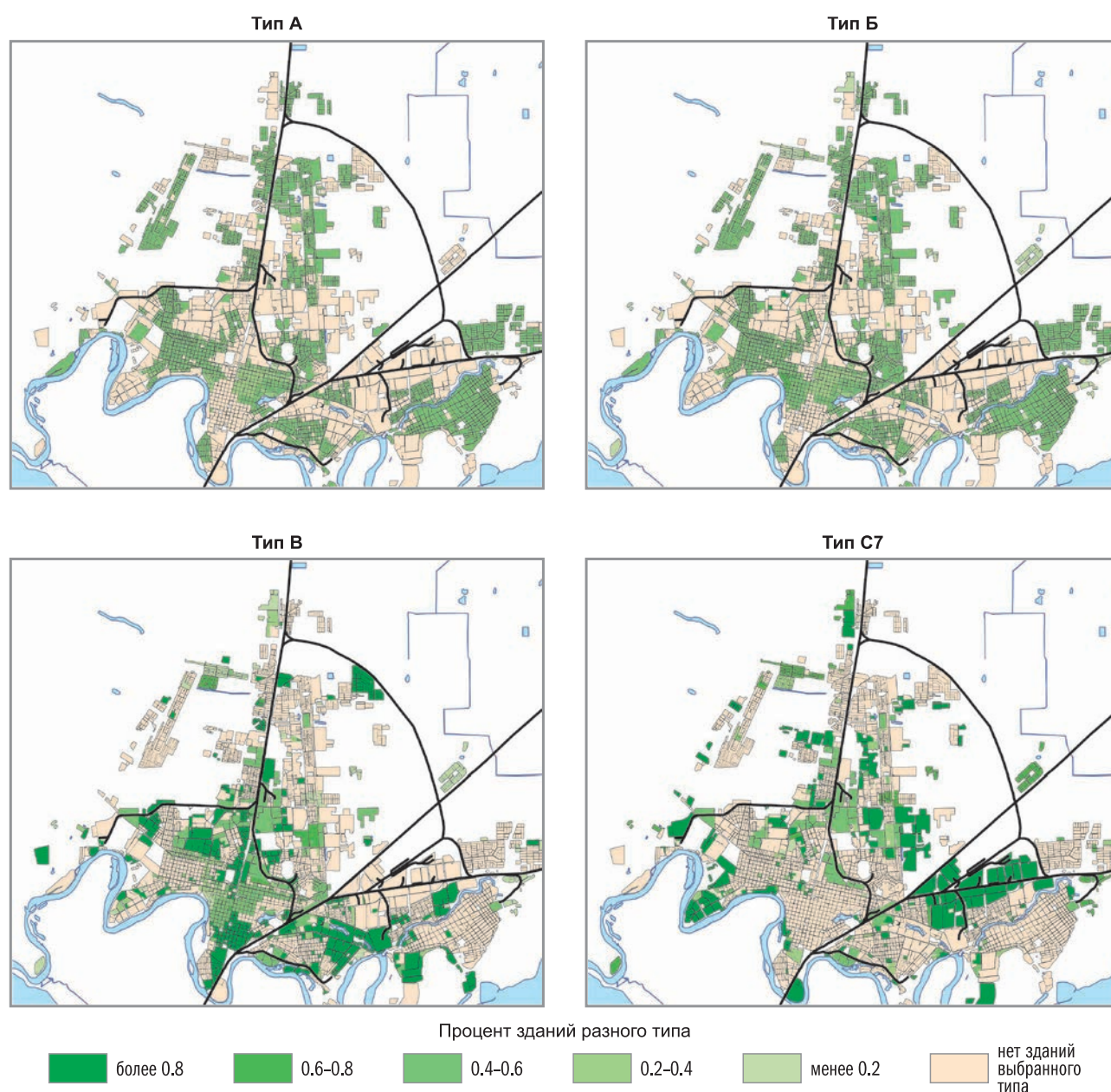
Для моделирования последствий землетрясения в столице Краснодарского края была выполнена актуализация поквартальных моделей застройки города с использованием информации ГИС ЖКХ, фотопанорам компании «Яндекс» и космических снимков. На рис. 5 показана плотность распределения разных типов зданий по кварталам города, классифицированная по шкале MMSK-86.

В Краснодаре по данным СМИ сильные подземные толчки ощутили жители центральной части города, Школьного, Фестивального

и Юбилейного микрорайонов, а также в Черёмушках и на севере города.

На рис. 6 приводится распределение расчётных  $I_{\text{расч}}$  и наблюдаемых  $I_{\text{набл}}$  интенсивностей для территории Краснодара, размещённых на сайте EMSC.

Сравнение расчётных интенсивностей  $I_{\text{расч}}$ , полученных с применением ГИС «Экстремум», с наблюдаемыми значениями  $I_{\text{набл}}$  [Зверева, Клянчин, 2024] показало, что оценки интенсивности, полученные с помощью моделирования, хорошо согласуются с реальными данными (табл. 4).



**Рис. 5.** Плотность распределения типов зданий по кварталам Краснодара, классифицированная по шкале MMSK-86

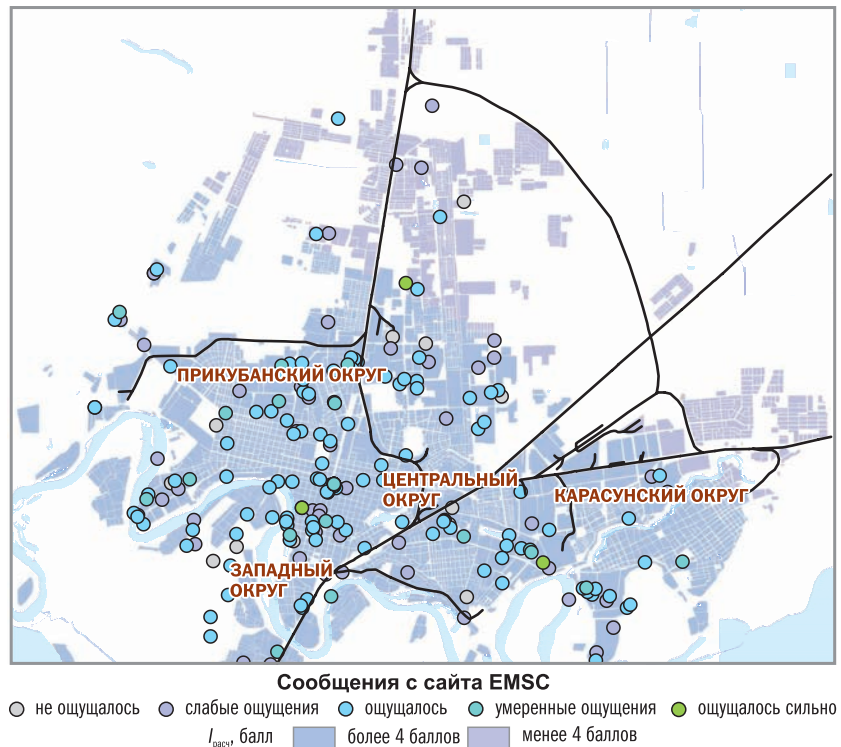


Рис. 6. Результаты моделирования сейсмической интенсивности  $I_{расч}$  для территории Краснодара и отклики жителей разных районов города, размещённые на сайте EMSC

Таблица 4. Сравнение расчётных и наблюждённых интенсивностей по публикации [Зверева, Клянчин, 2024]

| Районы Краснодара                 | $I_{набл}$ , балл | Количество респондентов, $N$ | $I_{расч}$ , балл | $\Delta I$ , балл |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
| Юбилейный                         | 4                 | 11                           | 4.4               | <0.5              |
| Центральный                       | 4                 | 60                           | 4.2               | <0.5              |
| Гидростроителей                   | 4                 | 10                           | 4.2               | <0.5              |
| Пашковский                        | 4                 | 4                            | 4.1               | <0.5              |
| Черёмушки                         | 4                 | 12                           | 4.1               | <0.5              |
| 40 лет Победы                     | 4                 | 2                            | 4.1               | <0.5              |
| Завод измерительных приборов      | 4                 | 2                            | 4.1               | <0.5              |
| Краевая клиническая больница      | 4                 | 2                            | 4.0               | <0.5              |
| Восточная промышленная зона       | 4                 | 2                            | 4.1               | <0.5              |
| Табачная фабрика                  | 4                 | 2                            | 4.1               | <0.5              |
| Микрохирургия глаза               | 4                 | 1                            | 4.3               | <0.5              |
| Курортный                         | 4                 | 1                            | 4.2               | <0.5              |
| Кожзавод                          | 4                 | 1                            | 4.3               | <0.5              |
| Старый центр                      | 4                 | 71                           | 4.3               | <0.5              |
| Губернский                        | 3–4               | 1                            | 4.0               | <0.5              |
| Новая Адыгея                      | 3                 | 5                            | 4.3               | 1–1.5             |
| Комсомольский                     | 3                 | 6                            | 4.0               | 0.5–1             |
| Фестивальный                      | 3                 | 18                           | 4.2               | 0.5–1.5           |
| Западный обход                    | 3                 | 4                            | 4.0               | 0.5–1             |
| Камвольно-суконный комбинат       | 3                 | 1                            | 4.0               | 0.5–1             |
| Славянский                        | 3                 | 5                            | 4.2               | 0.5–1.5           |
| Завод радиоизмерительных приборов | 2–3               | 4                            | 4.0               | 0.5–1             |

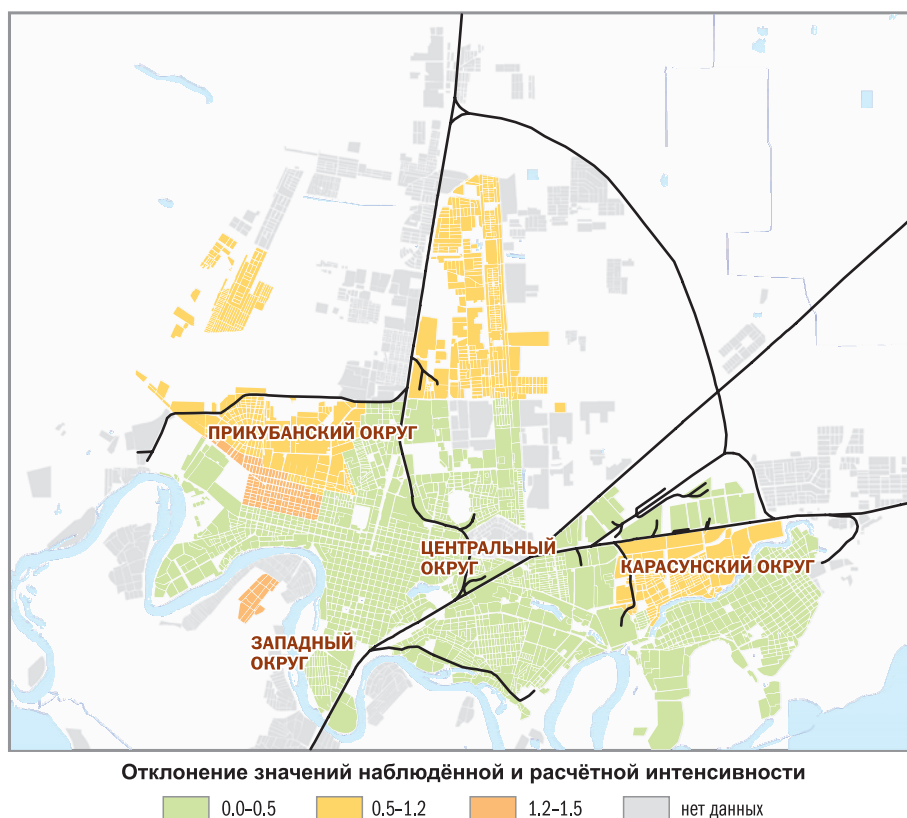
Для отдельных районов Краснодара с  $I_{\text{набл}}=3$  балла отклонения расчётных значений интенсивности  $I_{\text{расч}}$  от наблюдаемых значений  $I_{\text{набл}}$  превысили 1–1.5 балла, что может быть связано как с ограниченностью данных для полного анализа особенностей затухания интенсивности, так и с недостатками калибровки моделей ГИС «Экстремум» для низких значений интенсивности. Распределение погрешностей в определении расчётной интенсивности  $I_{\text{расч}}$  по сравнению с наблюдаемым значением  $I_{\text{набл}}$  на территории города приведено на рис. 7.

Для 20% территории Краснодара отсутствуют данные для сравнения, т.е. жители этих районов либо не ощутили землетрясение, либо не передали данные. Такая неопределённость затрудняет исследование. Сбор свидетельств о землетрясениях (т.е. качественных описаний ощущаемых сотрясений) имеет важное значение для макросейсмических исследований. С этой целью в приложение для смартфонов и на мобильный сайт Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC) был добавлен опросник с миниатюрами. Миниатюры разработаны профессиональным художником-карикатуристом, культурно нейтральны и отражают каждый уро-

вень Европейской макросейсмической шкалы 1998 г. [Bossu et al., 2017]. Использование этого метода позволило ускорить и увеличить объём собранных данных по сравнению с использованием традиционных онлайн-опросников.

Выполнено сравнение реакции (описаний ощущаемых сотрясений) жителей Краснодара на землетрясение в зависимости от типа застройки кварталов. С помощью инструментов геопространственного анализа получены совмещённые данные «Уровень шкалы EMS-98» — квартал города с определённым видом застройки. В связи с качеством исходных данных о поквартальной застройке и точностью определения местонахождения респондента по сигналу GPS удалось получить 121 значение совмещённых данных. Результаты совмещения представлены в табл. 5.

По информации, размещённой на сайте EMSC жителями Краснодара, проживающими в кварталах с преобладающим типом застройки С7, 47 откликов жителей были отнесены к категории «Слабое» или «Едва ощутимое». Четыре отклика в кварталах с такой же застройкой попали в категорию «Не ощущалось», два отклика — «Широко наблюдаемое», один отклик — «Сильное».



**Рис. 7.** Сравнение расчётных  $I_{\text{расч}}$  и наблюдаемых  $I_{\text{набл}}$  интенсивностей по данным [Зверева, Клянчин, 2024]

**Таблица 5.** Сравнение откликов разного уровня от жителей Краснодара на землетрясение 24 января 2024 г. в зависимости от типа застройки и высоты зданий

| Уровень шкалы EMS-98                                      | Количество откликов | Среднее количество этажей |
|-----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------|
| <i>В кварталах 100% зданий типа С7 по шкале MMSK-86</i>   |                     |                           |
| Не ощущалось                                              | 4                   | 12                        |
| Едва ощутимое                                             | 14                  | 12                        |
| Слабое                                                    | 33                  | 13                        |
| Широко наблюдаемое                                        | 2                   | 15                        |
| Сильное                                                   | 1                   | 16                        |
| <i>В кварталах 80% зданий типа В и 20% зданий типа С7</i> |                     |                           |
| Слабое                                                    | 2                   | 9                         |
| <i>В кварталах 60% зданий типа В и 40% зданий типа С7</i> |                     |                           |
| Слабое                                                    | 1                   | 9                         |
| <i>В кварталах 40% зданий типа В и 60% типа С7</i>        |                     |                           |
| Слабое                                                    | 1                   | 10                        |
| <i>В кварталах 20% зданий типа В и 80% типа С7</i>        |                     |                           |
| Слабое                                                    | 1                   | 10                        |
| <i>В кварталах 10% зданий типа В и 90% типа С7</i>        |                     |                           |
| Едва ощутимое                                             | 1                   | 9                         |
| <i>В кварталах 100% зданий типа В</i>                     |                     |                           |
| Едва ощутимое                                             | 10                  | 3                         |
| Слабое                                                    | 29                  | 4                         |
| Широко наблюдаемое                                        | 5                   | 4                         |
| Сильное                                                   | 1                   | 6                         |
| <i>В кварталах 50% зданий типа А и 50% типа Б</i>         |                     |                           |
| Не ощущалось                                              | 4                   | 1                         |
| Едва ощутимое                                             | 4                   | 1                         |
| Слабое                                                    | 5                   | 1                         |
| Широко наблюдаемое                                        | 3                   | 1                         |

Прослеживается тенденция зависимости макросейсмического эффекта от высоты здания: чем выше здание, тем сильнее реакции, передаваемые респондентами на сайт EMSC. Из кварталов города, характеризующихся смешанной застройкой зданиями типов С7 и В, поступили шесть откликов жителей, пять из которых отнесены к категории «Слабое». Средняя этажность зданий в этой категории смешанной застройки составляет 9–10 этажей, что значительно ниже средней этажности 12–16 этажей для кварталов со 100% застройкой зданиями типа С7. При увеличении процента зданий типа С7 в кварталах со смешанной застройкой увеличивается средняя этажность зданий, что логично сказывается на оценках ощущений респондентов в таких кварталах. Для кварталов города с преобладающей застройкой зданиями типа В, где средние высоты ниже (3–6 этажей), чем в кварталах

с застройкой зданиями типа С7 или смешанной застройки зданиями типа С7 и В, на основе полученных 45 откликов респондентов также прослеживается зависимость силы ощущений респондентов от высоты зданий. Для кварталов со смешанной застройкой зданиями типа А и Б на основе 16 откликов респондентов получено практически равномерное распределение разной степени ощущений по категориям. Относительно небольшое количество откликов в этих кварталах (16 из 286 откликов респондентов) может быть объяснено тем фактом, что землетрясение произошло в рабочее время. Как правило, большинство откликов пришлось на деловую часть города с преобладающей или смешанной застройкой с типом зданий С7.

Результаты настоящего исследования хорошо согласуются с выводами, полученными в ходе исследований итальянских учёных

в Национальном институте геофизики и вулканологии (INGV). В частности, в работах [Sbarra *et al.*, 2012; 2020] на основе анализа макросейсмических описаний о 1029 землетрясениях в Италии с локальной магнитудой ( $M_L$ ) от 3.0 до 5.9 за период с января 2009 г. по декабрь 2013 г., собранных у жителей через Интернет, показано усиление макросейсмического эффекта пропорционально высоте этажа, с которого поступило описание ощущений. В работах итальянских исследователей отмечается, что высота здания, как параметр, влияющий на интенсивность, никогда не упоминается в макросейсмических шкалах. Тем не менее для малоэтажных зданий (один или два этажа) регистрируется постепенное снижение интенсивности в зависимости от расстояния в сравнении с более высокэтажными зданиями. Повышенное затухание интенсивности для малоэтажных зданий, достигающее  $-0.3$  мкс на гипоцентрального расстоянии 200 км, предположительно связано с высокочастотными колебаниями земли и их амплитудой, уменьшающейся с расстоянием. Также итальянскими исследователями был сделан вывод, что для землетрясений малых магнитуд наблюдатели на втором этаже двухэтажного здания ощущают более сильные толчки, чем наблюдатели на десятом этаже десятиэтажного здания.

### Обсуждение результатов

В статье представлены результаты разработки средства имитационного моделирования обстановки в зоне влияния землетрясения, основанного на его параметрах (координаты эпицентра, глубина очага и магнитуда). Разработанный модуль, интегрированный в ГИС «Экстремум», обеспечивает последовательное получение пространственного распределения сейсмической интенсивности (построение макросейсмического поля) и формирование тематических карт, отражающих ожидаемые степени повреждения зданий и сооружений, а также оценку ущерба здоровью населения, находящегося в повреждённых зданиях.

Выявлена необходимость калибровки используемой имитационной модели. Традиционно калибровка осуществляется на основе детальных описаний последствий сильных землетрясений, включающих данные о параметрах очага, макросейсмические данные, в т.ч. карты изосейст и список населённых пунктов с указанием значений наблюденной сейсмической интенсивности, описание степеней повреждения зданий и сооружений, а также сведения о числе травми-

рованных и погибших. Однако области, затронутые слабыми землетрясениями, не приводящими к значительному ущербу, редко подвергаются детальному обследованию, что ограничивает доступность данных для калибровки.

Предлагается использовать данные о слабых и ощутимых землетрясениях, которые происходят значительно чаще, в качестве дополнительного источника информации для калибровки модели. В частности, рассматриваются записи сообщений жителей об ощущениях, испытанных во время таких землетрясений. При наличии достаточного количества таких сообщений с указанием местоположения корреспондента и характеристик места проживания, возможно оценить сейсмическую интенсивность без проведения специальных измерений.

Полученные авторами результаты имитационного моделирования сейсмической интенсивности с использованием ранее откалиброванных моделей ГИС «Экстремум» демонстрируют удовлетворительную сходимость оценок сейсмической интенсивности, полученных на основе ощущений жителей и макросейсмического обследования.

Анализ экспериментальных данных выявил следующие три закономерности, влияющие на сходимость оценок.

**Влияние интенсивности.** Наиболее точные оценки достигаются в областях с интенсивностью 4 балла и выше. Оценка интенсивности в областях с более низкими значениями сопряжена с большими трудностями.

**Влияние этажности и уязвимости зданий.** Оценка интенсивности по ощущениям жителей верхних этажей многоэтажных зданий с высокой уязвимостью является более точной.

**Влияние методических ограничений.** Зафиксированная погрешность в оценке интенсивности зависит не только от вариативности перечисленных факторов (интенсивности, этажности, класса уязвимости), но и от предположения об истинности значений, предоставляемых моделью.

Для выяснения причин расхождений в оценках интенсивности более чем на 1 балл требуется проведение дополнительных исследований с использованием расширенного массива данных. Особое внимание следует уделить совершенствованию шкал, отражающих зависимость между реакцией людей на землетрясение, её описаниями и интенсивностью землетрясения.

Использование сообщений жителей, оказавшихся в зоне землетрясения, с указанием места, времени и условий проживания, позволяет

оперативно уточнить калибровочные параметры модели затухания сейсмической интенсивности. Авторы полагают, что данный подход является перспективным для повышения качества оперативного моделирования последствий ощутимых землетрясений.

### Выводы

Проведённое оперативное моделирование последствий ощутимого землетрясения 24 января 2024 г. в Краснодарском крае вблизи Краснодара показало эффективность использования имитационных моделей ГИС «Экстремум» для быстрой оценки потенциального ущерба и информирования органов управления в кризисных ситуациях. Полученные результаты, несмотря на некоторые отклонения в отдельных районах, в целом согласуются с данными наблюдений, что подтверждает возможность применения разработанных моделей для задач АИУС РСЧС.

Использование представленных в статье данных оперативного моделирования последствий землетрясений с помощью ГИС «Экстремум» в рамках деятельности АИУС РСЧС позволяет:

- оценить масштаб потенциального ущерба — количество пострадавших, повреждённых зданий и объектов инфраструктуры, что необходимо для планирования спасательных операций и оказания помощи или информирования населения для предотвращения паники и распространения ложной информации;
- определить приоритетные зоны для реагирования — распределение сейсмической интенсивности и степени повреждений позволяет определить районы или городские кварталы, нуждающиеся в первоочередной помощи;
- оптимизировать распределение ресурсов — оценка масштаба ущерба позволяет эффективно распределять ресурсы и координировать действия различных служб.

Для повышения надёжности результатов моделирования последствий сильных и ощутимых землетрясений с помощью ГИС «Экстремум» необходимо продолжение исследований по калибровке математических моделей системы с использованием данных о прошлых землетрясениях и откликах населения. Особое внимание следует уделить калибровке моделей для низких значений интенсивности макросейсмического поля. В этой связи целесообразно отметить важность внедрения в ФИЦ ЕГС РАН практику сбора макросейсмической информации на Северном Кавказе и расчёта среднего балла в населённом пункте по макросейсмической

шкале ШСИ-17, учитывающей, на каком этаже находился респондент.

Также необходимо уделить внимание актуализации данных о застройке сейсмоопасных районов страны, регулярно обновлять и уточнять данные о застройке населённых пунктов, включая информацию о распределении типов зданий по шкале MMSK-86, их этажности и состоянии на текущий момент.

Для повышения осознания сейсмической опасности населением и исполнительными органами власти целесообразно размещение на сайте ФИЦ ЕГС РАН результатов моделирования прогнозов распределения возможной сейсмической интенсивности и средних степеней повреждения застройки пострадавшего региона, наряду с параметрами сильных и ощутимых землетрясений.

Крайне важным представляется развитие краудсорсинговых платформ для сбора информации об ощущениях населения после землетрясений, что позволит актуализировать результаты моделирования и оперативно получать данные о распределении сейсмической интенсивности и масштабе ущерба.

Реализация рекомендаций по совершенствованию моделей, баз данных ГИС «Экстремум» и дальнейшее развитие веб-сайта ФИЦ ЕГС РАН позволят значительно повысить эффективность решений в рамках АИУС РСЧС для обеспечения безопасности населения в сейсмоопасных регионах.

**Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № 122022400105-9 «Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий».**

### Литература

Габсатарова И.П., Никонов А.А., Каменская О.П., Флейфель Л.Д. Реконструкция макросейсмических полей землетрясений Северо-Западного Кавказа с целью уточнения сейсмической опасности региона // Глубинное строение, минерагения, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов. Материалы XX Всероссийской конференции с международным участием / Под ред. Н.М. Чернышова. — Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. — С. 117–122.

Зверева А.С., Клянчин А.И. Землетрясение 24 января 2024 г. в районе г. Краснодара с  $M_w=4.1$ ,  $I_0=5$  баллов // Российский сейсмологический журнал. —

2024. — Т. 6, № 2. — С. 70–81. — DOI: 10.35540/2686-7907.2024.2.05. — EDN: WPLUZZ

Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Суцев С.П., Козлов М.А., Малаева Н.А., Барская Т.В. Оценка сейсмического риска // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2017. — № 2. — С. 22–37. — EDN: YFYKVP

Методика прогнозирования последствий землетрясений. — М.: ВНИИ ГОЧС-ЦИЭКС-СЦ ИГЭ РАН, 2000. — 27 с.

Никонов А.А. Поперечные глубинные зоны разломов Северо-Западного Кавказа (по макросейсмическим данным) // Проблемы региональной тектоники Северного Кавказа и прилегающих территорий: Тезисы докладов Международной конференции. — Геленджик—Краснодар, 1997. — С. 31–32.

Никонов А.А. Новый подход к оценке сейсмического потенциала и сейсмической опасности Черноморского побережья Кавказа (по археосейсмическим материалам) // Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности. Материалы Международной конференции / Отв. ред. В.С. Имаев. — Нерюнгри: Изд-во Технического института (ф) СВФУ, 2015. — С. 267–274.

Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска. Пособие для должностных лиц / Отв. ред. Г.А. Соболев. — М.: БСТС Центр, 1997. — 54 с.

Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. — М.: ГЕОС, 2002. — 224 с.

Фролова Н.И., Боннин Ж., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Барская Т.В. Анализ факторов, влияющих на надёжность оперативных оценок потерь от землетрясений // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 18 / Отв. ред. В.И. Осипов. — М.: РУДН, 2016. — С. 230–234. — EDN: VULRKF

Фролова Н.И., Угаров А.Н. База знаний о сильных землетрясениях как инструмент повышения надёжности оперативных оценок потерь // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2018. — № 6. — С. 3–20. — DOI: 10.1134/S0869780318060017. — EDN: YMFUYP

Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Петрова Н.В., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Влияние особенностей затухания сейсмической интенсивности на надёжность оперативных оценок потерь от землетрясений // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2019. — № 5. — С. 23–37. — DOI: 10.31857/S0869-78092019523-37. — EDN: CEPYTD

Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 95–121.

Шебалин Н.В. Опорные землетрясения и уравнения макросейсмического поля // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г. — М.: Наука, 1977. — С. 20–30.

Шебалин Н.В., Еришов И.А., Шестоперов Г.С., Гехман А.С. Улучшенный вариант шкалы сейсмической интенсивности (MMSK-86) на базе шкал MSK-64 и MCCC-73 (заключительный отчёт). — М.: МССС, ИФЗ, 1986. — 61 с.

Bossu R., Landès M., Roussel F., Steed R., Mazet-Roux G., Martin S.S., Hough S. Thumbnail-based questionnaires for the rapid and efficient collection of macroseismic data from Global earthquakes // Seismological Review Letters. — 2017. — V. 88, N 1. — P. 72–81. — DOI: 10.1785/0220160120

Contreras D., Wilkinson S., Aktas Y.D., Fallou L., Bossu R., Landès M. Intensity-based sentiment and topic analysis. The Case of the 2020 Aegean earthquake // Frontiers in Built Environment. Section Earthquake Engineering. — 2022. — V. 8. — A. 839770. — DOI: 10.3389/fbuil.2022.839770

De Groeve T. Global disaster alert and coordination system — earthquake alerts for international humanitarian response // IDRC Davos 2006. Proceedings of the international disaster reduction conference. — Davos, Switzerland: Swiss Federal Research Institute WSL, 2006.

De Groeve T., Annunziato A., Gadenz S., Vernaccini L., Erberik A., Yilmaz T. Real-time impact estimation of large earthquakes using USGS Shakemaps // IDRC Davos 2008. Proceedings of the international disaster reduction conference. — Davos, Switzerland: Swiss Federal Research Institute WSL, 2008.

Fallou L., Marti M., Dallo I., Corradini M. How to fight earthquake misinformation: A Communication guide // Seismological Research Letters. — 2022. — V. 93, N 5. — P. 2418–2422. — DOI: 10.1785/0220220086

Fournier d'Albe E.M. An approach to earthquake risk management // Engineering Structures. — 1982. — V. 4. — P. 145–152.

Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.0.1 // GEM. The OpenQuake-engine User Manual, 2018. — 198 p. — DOI: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.0.1

Karnik V. Existing recommendations and definitions on disaster insurance // The Geneva Papers. — 1984. — V. 9, N 30. — P. 3–7.

Karnik V., Algermissen S.T. Seismic zoning: The assessment and mitigation of earthquake risk. — UNESCO, Paris, 1978. — P. 11–47.

Lilienkamp H., Bossu R., Cotton F., Finazzi F., Landès M., Weatherill G., von Specht S. Utilization of crowdsourced felt reports to distinguish high-impact from low-impact earthquakes globally within minutes of an event // *The Seismic Record*. — 2023. — V. 3, N 1. — P. 29–36. — DOI: 10.1785/0320220039

*Mitigating natural disasters: Phenomena, effects and options*. A Manual for policy makers and planners / Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator. — New York: UN, 1991. — 164 p.

Nievas C.I., Crowley H., Weatherill G., Cotton F. Real-time loss tools: Open-source software for time- and state-dependent seismic damage and loss calculations — features and application to the 2023 Türkiye-Syria Sequence. REPORT. — 2025. — DOI: 10.26443/Seismica.v4i1.1238

*Risk assessment and mapping guidelines for disaster management*. Commission Staff Working Paper. — Brus-

sels: Council of the European Union, 2010. — 42 p. — URL: <http://register.consilium.europa.eu/pdf/en/10/st17/st17833.en10.pdf>

Sbarra P., Tosi P., De Rubeis V., Rovelli A. Influence of observation floor and building height on macroseismic intensity // *Seismological Research Letters*. — 2012. — V. 83, N 2. — P. 261–266. — DOI: 10.1785/gssrl.83.2.261

Sbarra P., Tosi P., De Rubeis V., Sorrentino D. Quantification of earthquake diagnostic effects to assess low macroseismic intensities // *Natural Hazards*. — 2020. — V. 104, N 3. — P. 1957–1973. — DOI: 10.1007/s11069-020-04256-6

*UNISDR terminology on disaster risk reduction*, 2009. — Geneva, Switzerland: UNISDR, 2009. — 30 p. — URL: [https://www.preventionweb.net/files/7817\\_UNISDRTerminologyEnglish.pdf](https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf)

### Сведения об авторах

**Фролова Нина Иосифовна**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: frolovanina7@gmail.com

**Малаева Наталья Сергеевна**, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (федеральный центр науки и высоких технологий) (ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)). Москва, Россия; науч. сотр. ИГЭ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: natashamalaeva@yandex.ru

**Суцев Сергей Петрович**, д-р техн. наук, проф., директор Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва, Россия. E-mail: Sersan150@mail.ru

**Угаров Александр Николаевич**, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия. E-mail: garo-1@yandex.ru

## Near real-time felt earthquakes loss simulation

© 2025 N.I. Frolova<sup>1</sup>, N.S. Malaeva<sup>1,2</sup>, S.P. Suchshev<sup>3</sup>, A.N. Ugarov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IEG RAS, Moscow, Russia; <sup>2</sup>VNII GOChS (FC), Moscow, Russia; <sup>3</sup>BMSTU, Moscow, Russia

Received April 24, 2025

**Abstract** On January 24, 2024, an earthquake with  $m_b=4.3$  occurred near Krasnodar, causing a macroseismic effect. The GIS “Extremum” models were used for simulation possible intensities and expected damage to the infrastructure. Good agreement between calculated and observed values of  $I=4$  on the MSK-64 scale was obtained. This result was achieved through the using of calibrated models of seismic intensity attenuation. The overestimation of the calculated values of  $I=3$  can be associated with both the limited observation data and the deficiencies in calibration for low values of the seismic intensity. The obtained near real time estimations of felt earthquakes consequences can be integrated into “Automated Information and Control System of the RSChS” (AICS RSChS) and provide the information for heads of executive departments and agencies in order to develop and implement measures aimed at population safety.

**Keywords** Felt earthquakes, near real-time loss simulation, GIS “Extremum”, Krasnodar.

**For citation** Frolova, N.I., Malaeva, N.S., Suchshev, S.P., & Ugarov, A.N. (2025). [Near real-time felt earthquakes loss simulation]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 7(2), 23-40. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.2.02>. EDN: IUDLHC

### References

- Bossu, R., Landès, M., Roussel, F., Steed, R., Mazet-Roux, G., Martin, S.S., & Hough, S. (2017). Thumb-nail-based questionnaires for the rapid and efficient collection of macroseismic data from global earthquakes, *Seismological Review Letters*, 88(1), 72-81. DOI: 10.1785/0220160120
- Contreras, D., Wilkinson, S., Aktas, Y.D., Fallou, L., Bossu, R., & Landès, M. (2022). Intensity-based sentiment and topic analysis. The case of the 2020 Aegean earthquake. *Frontiers in Built Environment. Section Earthquake Engineering*, 8, 839770. DOI: 10.3389/fbuil.2022.839770
- De Groeve, T. (2006). Global disaster alert and coordination system – earthquake alerts for international humanitarian response. In: *Proceedings of IDRC Davos 2006*. Davos, Switzerland: Swiss Federal Research Institute WSL.
- De Groeve, T., Annunziato, A., Gadenz, S., Vernacini, L., Erberik, A., & Yilmaz, T. (2008). Real-time impact estimation of large earthquakes using USGS Shakemaps. In: *Proceedings of IDRC Davos 2008*. Davos, Switzerland: Swiss Federal Research Institute WSL.
- Fallou, L., Marti, M., Dallo, I., & Corradini, M. (2022). How to fight earthquake misinformation: A Communication guide. *Seismological Research Letters*, 93(5), 2418-2422. DOI: 10.1785/0220220086
- Fournier d’Albe, E.M. (1982). An approach to earthquake risk management. *Engineering Structures*, 4, 145-152.
- Frolova, N.I., Bonnin, Zh., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N., & Barskaia, T.V. (2016). [Analysis of factors affecting the reliability of operational estimates of earthquake losses]. In *Sergeevskie chteniia. Inzhenernaia geologiya i geoekologiya. Fundamentalnye problemy i prikladnye zadachi. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii*. Vyp. 18. Otv. red. V.I. Osipov [Sergeyevsky readings. Engineering geology and geoecology. Fundamental problems and applied tasks. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology. Vol. 18. Ed. V.I. Osipov] (pp. 230-234). Moscow, Russia: RUDN University Publ. (In Russ.). EDN: VULRKF
- Frolova, N.I., & Ugarov, A.N. (2018). [Knowledge base about past earthquakes consequences as a tool to increase the reliability of near realtime loss estimation]. *Geoekologiya. Inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology], 6, 3-20. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0869780318060017. EDN: YMFUYP
- Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Petrova, N.V., Ugarov, A.N., & Malaeva, N.S. (2019). [Influence of shaking intensity attenuation peculiarities on reliability of earthquake loss estimation in emergency mode]. *Geoekologiya. Inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology], 5, 23-37. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869-78092019523-37. EDN: CEPYTD

- Gabsatarova, I.P., Nikonov, A.A., Kamenskaia, O.P., & Fleifel', L.D. (2016). [Reconstruction of the macroseismic earthquake fields of the Northwest Caucasus in order to clarify the seismic hazard of the region]. In *Glubinnoe stroenie, minerageniia, sovremennaiia geodinamika i seismichnost' Vostochno-Evropeiskoi platformy i sopredel'nykh regionov. Materialy XX Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Pod red. N.M. Chernyshova* [Deep structure, minerageny, modern geodynamics and seismicity of the East European Platform and adjacent regions. Proceedings of the XX All-Russian Conference with international participation. Ed. N.M. Chernyshov] (pp. 117-122). Voronezh, Russia: Publishing and Printing Center "Scientific book". (In Russ.).
- GEM. (2018). The OpenQuake-engine User Manual. *Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.0.1*, 198 p. DOI: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.0.1
- Karnik, V. (1984). Existing recommendations and definitions on disaster insurance. *The Geneva Papers*, 9(30), 3-7.
- Karnik, V., & Algermissen, S.T. (1978). *Seismic zoning: The assessment and mitigation of earthquake risk* (pp. 11-47). UNESCO, Paris.
- Larionov, V.I., Frolova, N.I., Ugarov, A.N., Sushchev, S.P., Kozlov, M.A., Malaeva, N.A., & Barskaia, T.V. (2017). [Seismic risk assessment]. *Geoekologiya. Inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geocology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology], 2, 22-37. (In Russ.). EDN: YFYKVP
- Lilienkamp, H., Bossu, R., Cotton, F., Finazzi, F., Landès, M., Weatherill, G., & von Specht, S. (2023). Utilization of crowdsourced felt reports to distinguish high-impact from low-impact earthquakes globally within minutes of an event. *The Seismic Record*, 3(1), 29-36. DOI: 10.1785/0320220039
- Metodika prognozirovaniia posledstviia zemletriasenii* [Earthquake impact forecasting methodology]. (2000). Moscow, Russia: VNII GOChS-TSIEKS-SC IGE RAS Publ., 27 p. (In Russ.).
- Mitigating natural disasters: Phenomena, effects and options*. (1991). A Manual for policy makers and planners. UNDRP. New York, USA: UN, 164 p.
- Nievas, C.I., Crowley, H., Weatherill, G., & Cotton, F. (2025). Real-time loss tools: Open-source software for time- and state-dependent seismic damage and loss calculations — features and application to the 2023 Türkiye-Syria Sequence. REPORT. DOI: 10.26443/Seismica.v4i1.1238
- Nikonov, A.A. (1997). [Transverse deep fault zones of the Northwest Caucasus (according to macroseismic data)]. In *Problemy regional'noi tektoniki Severnogo Kavkaza i prilagaiushchikh territorii: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii* [Problems of regional tectonics of the North Caucasus and adjacent territories: Abstracts of the International Conference] (pp. 31-32). Gelendzhik—Krasnodar, Russia. (In Russ.).
- Nikonov, A.A. (2015). [A new approach to assessing the seismic potential and seismic hazard of the Black Sea coast of the Caucasus (based on archaeoseismic materials)]. In *Geologo-geofizicheskaya sreda i raznoobraznye proiavleniia seismichnosti. Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii. Otv. red. V.S. Imaev* [Geological and geophysical environment and various manifestations of seismicity. Materials of the International Conference. Ed. V.S. Imaev] (pp. 267-274). Neryungri, Russia: Publishing House of the NEFU Technical Institute. (In Russ.).
- Sobolev, G.A. (Ed.). (1997). *Otsenka seismicheskoi opasnosti i riska. Posobie dlia dolzhnostnykh lits* [Assessment of seismic hazard and risk. Handbook for officials]. Moscow, Russia: BSTS Center Publ., 54 p. (In Russ.).
- Risk assessment and mapping guidelines for disaster management. (2010). *Commission Staff Working Paper*. Brussels: Council of the European Union, 42 p. Available at: <http://register.consilium.europa.eu/pdf/en/10/st17/st17833.en10.pdf>
- Sbarra, P., Tosi, P., De Rubeis, V., & Rovelli, A. (2012). Influence of observation floor and building height on macroseismic intensity. *Seismological Research Letters*, 83(2), 261-266. DOI: 10.1785/gssrl.83.2.261
- Sbarra, P., Tosi, P., De Rubeis, V., & Sorrentino, D. (2020). Quantification of earthquake diagnostic effects to assess low macroseismic intensities. *Natural Hazards*, 104(3), 1957-1973. DOI: 10.1007/s11069-020-04256-6
- Shebalin, N.V. (1968). [Methods of using engineering and seismological data in seismic zoning]. In *Seismicheskoe raionirovanie SSSR* [Seismic zoning of the USSR] (pp. 95-121). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Shebalin, N.V. (1977). [Reference earthquakes and macroseismic field equations]. In *Novyj katalog sil'nykh zemletryasenij na territorii SSSR s drevnejshih vremyon do 1975 g.* [New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975] (pp. 20-30). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Shebalin, N.V., Ershov, I.A., Shestoporov, G.S., & Gekhman, A.S. (1986). *Uluchshennyi variant shkaly seismicheskoi intensivnosti (MMSK-86) na baze shkal MSK-64 i MSSSS-73 (zakliuchitel'nyi otchet)* [An improved version of the seismic intensity scale (MMSK-86) based on the MSK-64 and MS-73 scales (final report)]. Moscow, Russia: MSSSS, IPE Publ., 61 p. (In Russ.).
- Trifonov, V.G., Soboleva, O.V., Trifonov, R.V., & Vostrikov, G.A. (2002). *Sovremennaiia geodinamika Al'piisko-Gimalaiskogo kollizionnogo poiasa* [Recent geodynamics of the Alpine-Himalayan collision belt]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 224 p. (In Russ.).
- UNISDR terminology on disaster risk reduction*, 2009 (2009). Geneva, Switzerland: UNISDR Publ., 30 p.

Available at: [https://www.preventionweb.net/files/7817\\_UNISDRTerminologyEnglish.pdf](https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf)

Zvereva, A.S., & Klianchin, A.I. (2024). [Earthquake on January 24, 2024 near Krasnodar city, Mw=4.1,

$I_0=5$ ]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(2), 70-81. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2024.2.05. EDN: WPLUZZT

### Information about authors

**Frolova Nina Iosifovna**, PhD, Leading Researcher of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS), Moscow, Russia. E-mail: frolovanina7@gmail.com

**Malaeva Natalya Sergeevna**, Senior Researcher of the Federal State Budgetary Establishment "All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies of the EMERCOM of Russia" (Federal Science and High Technology Center) (VNII GOChS (FC)), Moscow, Russia; Researcher of the IEG RAS, Moscow, Russia. E-mail: natashamalaeva@yandex.ru

**Sushchev Sergey Petrovich**, Dr., Professor, Director of the Scientific and Educational Extreme Situations Research Center of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bauman Moscow State Technical University" (BMSTU), Moscow, Russia. E-mail: Sersan150@mail.ru

**Ugarov Alexander Nikolaevich**, PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the BMSTU, Moscow, Russia. E-mail: garo-1@yandex.ru