

22-23 октября 2025 г., Москва

Моделирование последствий сценарных землетрясений на примере городов Краснодарского края

Н.И. Фролова¹, И.П. Габсатарова², С.П. Суцев³, А.Н. Угаров³, Н.С. Малаева⁴

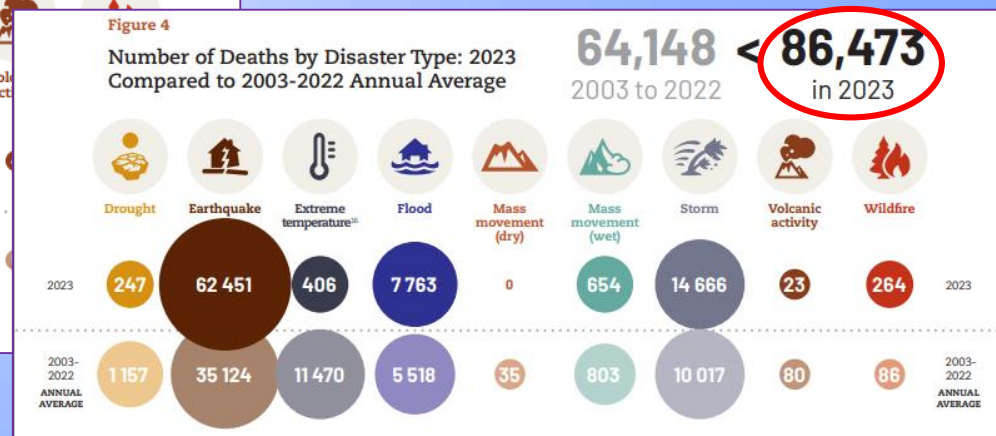
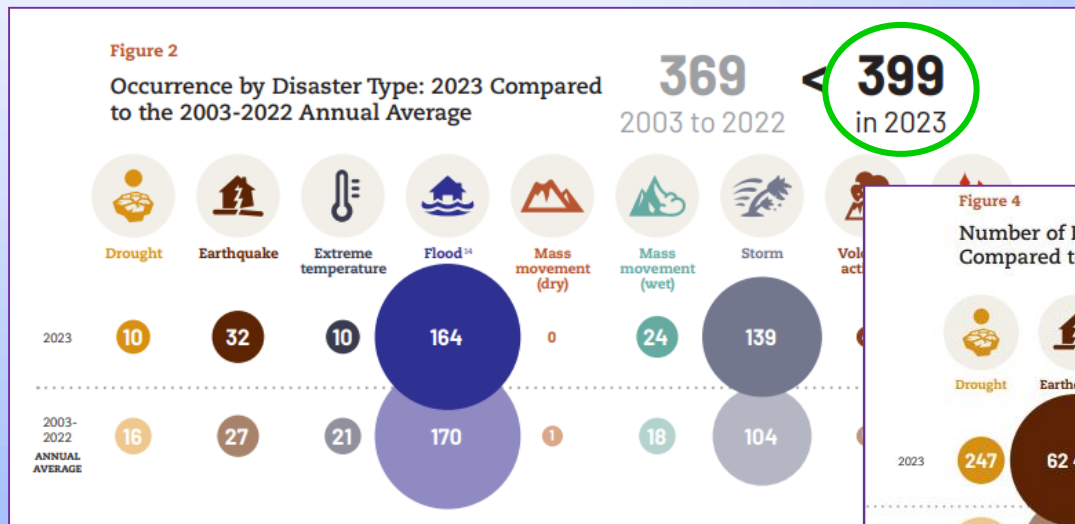
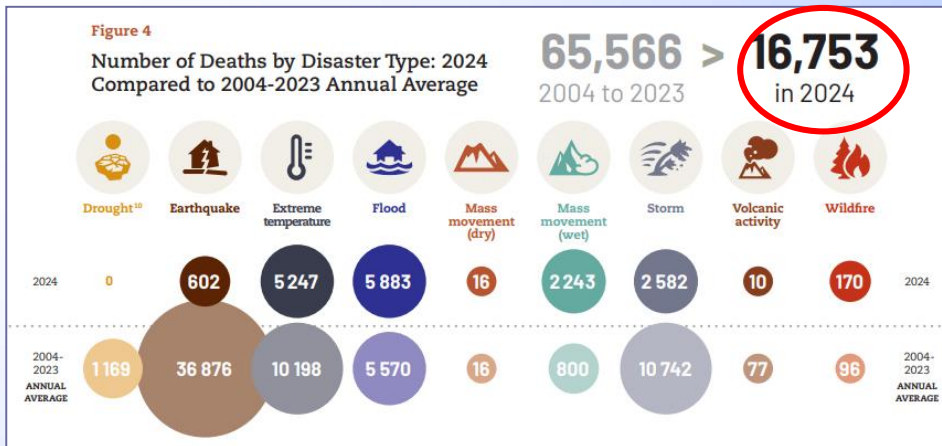


¹ *Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН*

² *Федеральный исследовательский центр «Единая Геофизическая Служба РАН»*

³ *Московский Государственный Технический Университет им. Баумана*

⁴ *ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)*



Согласно статистике Международного центра эпидемиологии катастроф (EMDAT), в 2024 году от природных катастроф погибло 16 753 человек, что ниже среднего показателя за 2004–2023 годы, составляющего 65 566 погибших, что в основном объясняется отсутствием катастрофических землетрясений и других крупных катастроф как цунами, штормы или тепловые волны, число погибших в результате которых может превышать 10 000 человек

Однако в 2023 году число погибших только от землетрясений превысило 60 000 человек, что вдвое превышает среднегодовой показатель за период с 2003 по 2022 год. Катастрофические землетрясения 2023 года в Турции, Сирии, Марокко и Афганистане свидетельствуют об усилении сейсмической активности в Альпийско-Гималайском сейсмоактивном поясе, к которому относятся сеймоопасные зоны Северного Кавказа

В целом территория Краснодарского края на современном этапе характеризуется умеренным уровнем сейсмичности, землетрясения с интенсивностью VII-VIII известны здесь в XIX–XX века
Самые значительные из них: 10.03.1834 г. с $M=3,5$, $I_0=6-7$ баллов; 18.08.1896 г. с $M=4,8$, $I_0=7$ баллов; 19.04.1926 г. с $M=5,3$, $I_0=7-8$ баллов

Краснодарский край самый сейсмоактивный в Южном Федеральном округе Российской Федерации. Сейсмический режим территории края неоднократно рассматривался в многочисленных работах Е.А. Рогожина и его коллег. Одним из последних таких исследований было детальное сейсмическое районирование Северо-Западного Кавказа с учетом результатов палеосейсмогеологических исследований. Результаты этих исследований по сейсмическому режиму и сотрясаемости легли в основу расчета оценок показателей сейсмического риска в КК

Значения индивидуального сейсмического риска R_{s1} Краснодарского края и Республики Адыгея

Диапазоны риска $R_{s1} \cdot 10^{-5}, 1/\text{год}$	Размеры зон с разными значениями риска R_{s1}	
	км ²	%
> 1	31367	41
1-10	19259	25
10-20	12206	16
20-30	4694	6
30-50	6015	8
< 50	2459	4
итого:	76000	100

Значения индивидуального сейсмического риска R_{s1} для отдельных городов Краснодарского края

Населенный пункт	Население, тыс. чел. *)	$R_{s1}, 10^{-5}, 1/\text{год}$
Анапа	82	28,7
Армавир	187	1,8
Краснодар	1 099	9,1
Кропоткин	76	0,6
Крымск	55	18,3
Лабинск	57	9,1
Новороссийск	262	28,7
г.о. город-курорт Сочи	564	18,3
Тимашевск	52	1,8
Туапсе	62	28,7

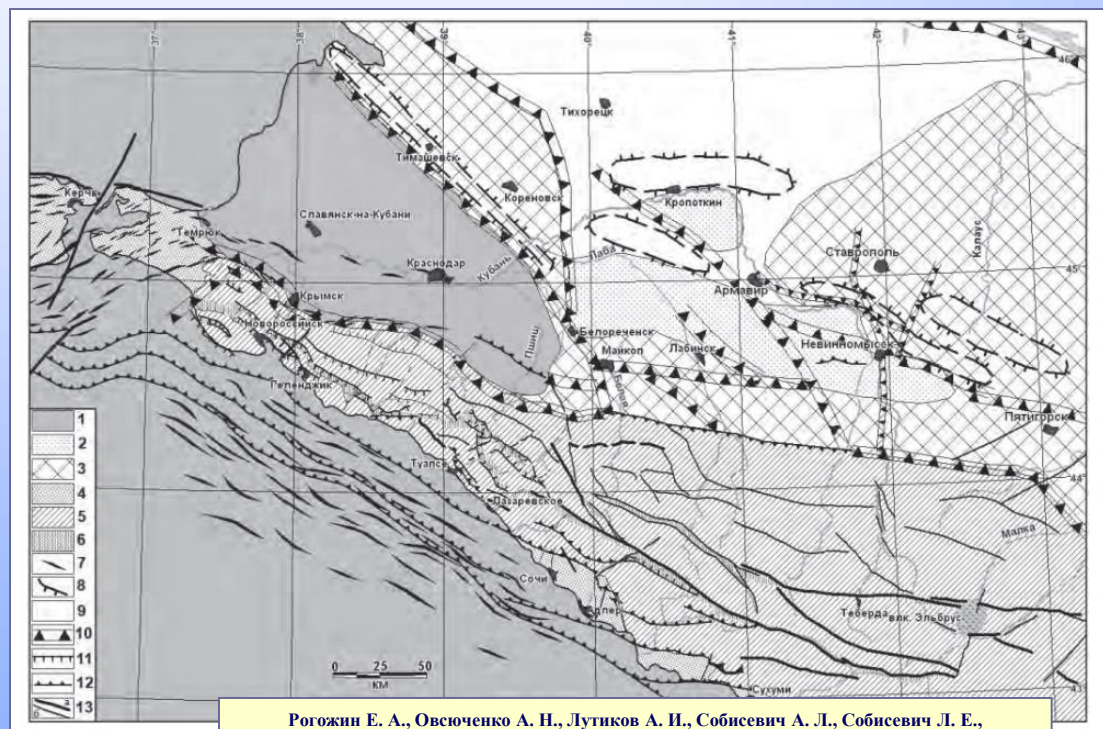
R_{s1} – индивидуальный сейсмический риск или вероятности смертельного исхода в год от возможного землетрясения с определенной интенсивностью

Территория Краснодарского края (КК) представляет собой зону сочленения платформенных и орогенных структур

В регионе с юго-запада на северо-восток выделяются крупнейшие тектонические структуры:

- Туапсинский прогиб со стороны Черного моря;
- Южный склон, Осевая зона, Северный склон горного сооружения Западного Кавказа;
- Западно-Кубанский передовой прогиб, примыкающий к Северному склону;
- Скифская плита и прилегающие области Восточно-Европейской платформы

Схема неотектоники Западного Кавказа и прилегающих территорий



Анализ пространственного распределения очагов землетрясений на территории Черноморского побережья Северного Кавказа, позволяет выделить условно три основные сейсмогенные зоны, проявление сейсмической активности в каждой из которых может вызвать заметные сотрясения грунта в населенных пунктах

Краснодарского края

Сейсмогенная зона I

приурочена к району между городами Анапа - Новороссийск – Геленджик и прибрежные к ним районы Черного моря. Землетрясения в этой зоне, имевшие интенсивность 6–7 баллов и $M \leq 5$, известны с 1830 г. Отличительной особенностью сеймотектонических процессов в этой зоне является сравнительно глубокое залегание очагов землетрясений - 20–50 км

Сейсмогенная зона II

приурочена к району курорта Большое Сочи и его окрестностям, вплоть до Красной Поляны.

Особенностью очагов землетрясений в этой зоне является их неглубокое залегание

Выделяются две подзоны: более активная Сочинско-Адлерская и менее сейсмичная – Туапсинская

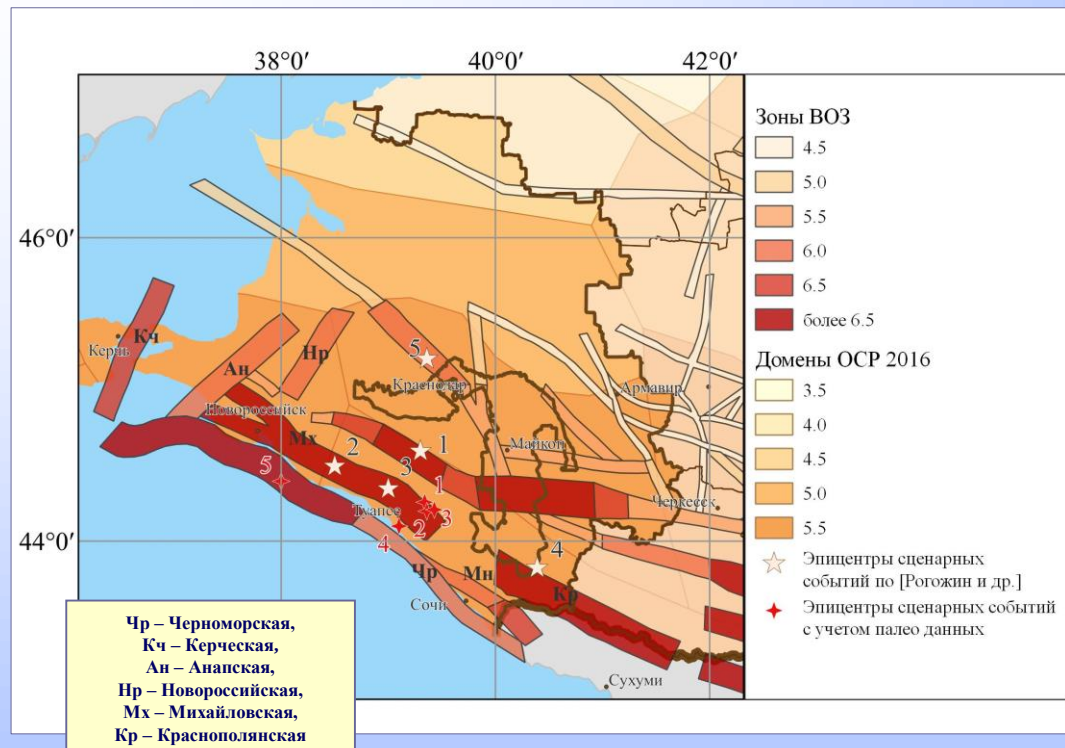
Наиболее обширная и сейсмоопасная зона – Тебердинско-Гегечкорско-Чхалтинская (III)

Территориально она вплотную примыкает к южной границе РФ, имеет ярко выраженное «кавказское» простираие и объединяет ряд подзон, ответственных за формирование на карте ОСР 2015-С обширной зоны 9-балльной интенсивности сотрясений, в которой потенциально возможны землетрясения с магнитудой до

7–7.5

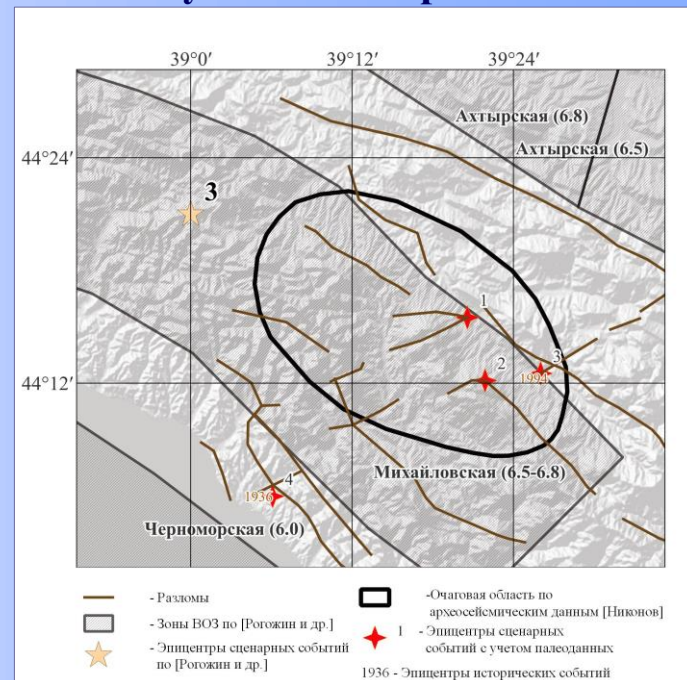
1 – Западно-Кубанский предгорный прогиб; 2 – локальные платформенные прогибы; 3 – области умеренных поднятий; 4 – Керченско-Таманская зона интенсивной складчатости Западно-Кубанского прогиба и продолжение Туапсинского прогиба на суше (Сочи-Адлерская и Сухумская депрессии); 5 – орогенное сооружение Большого Кавказа; 6 – шовно-депрессивные структуры в пределах Кавказа; 7 – оси антиклинальных складок в неоген-четвертичных отложениях; 8 – локальные платформенные валы; 9 – Скифская плита; 10 – флексурно-разрывные зоны; 11 – сбросы, штрихи направлены в сторону опущенного крыла; 12 – взбросы и надвиги, штрихи направлены в сторону поднятого крыла; 13 – разломы с неясной кинематикой: а – генеральные, б – локальные

Сценарные землетрясения в Краснодарском крае на фоне зон ВОЗ и доменов, построенных для ОСР-2016



Номер события	Долгота	Широта	h, км	M
№1	44.60	39.30	20/30/35	6.8
№2	44.50	38.5	30/35	6.8
№3	44.35	39.0	30	6.8
№4	43.82	40.39	30	6.8
№5	45.21	39.36	20/15	5.8

Сценарные землетрясения в Туапсинском районе



Палеосейсмологические исследования А.А. Никонова позволили существенно уточнить уровень сейсмической опасности Черноморского побережья Кавказа, выявив около 10 очаговых зон землетрясений с интенсивностью более 8 баллов, включая новую зону вблизи Туапсе с периодом повторения в несколько тысяч лет

На основе палеосейсмогеологических данных Е.А. Рогожиным реконструировано 6 сильных сейсмических событий голоцена в центральной части Северо-Западного Кавказа с периодом повторяемости 1000-1500 лет и магнитудой Mw 6.5-6.7, что соответствует прогнозным значениям Mmax=6.8

Наложение очаговой зоны Туапсе и Михайловской зоны ВОЗ позволило определить параметры сценарных событий с учетом палеоданных. В качестве местоположения очагов сценарных событий были выбраны места пересечения разломов и координаты исторических ощутимых землетрясений 1936, 1978 и 1994 гг.

Калибровка имитационных моделей системы «Экстремум» для проведения расчетов последствий землетрясений

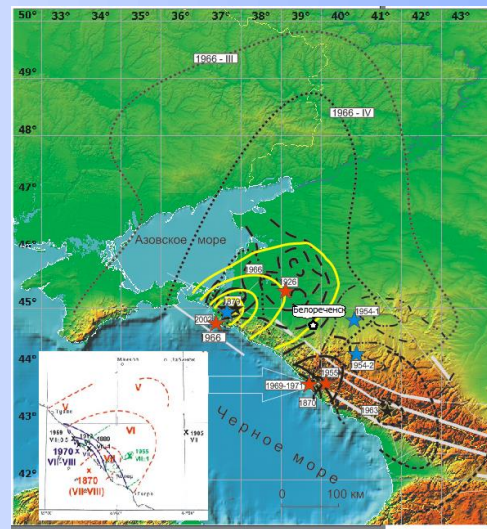


Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности системы «Экстремум» для территории Краснодарского края

Наиболее заметные землетрясения в Краснодарском крае

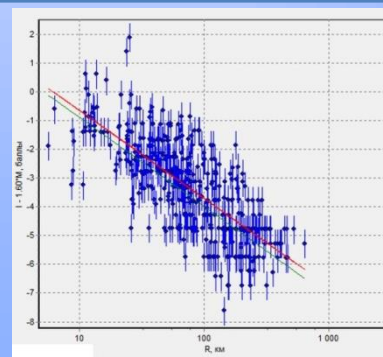
Дата	φ°	λ°	h , км	M	Дата	φ°	λ°	h , км	M
16.09.1799	45.20	38.20	30	5.1	13.05.1968	43.50	40.60	15	4.5
05.04.1812	45.00	42.50	10	3.7	25.05.1968	44.80	38.20	10	4.4
04.12.1830	44.90	37.30	12	4.8	04.12.1970	43.84	39.34	7	5.1
20.02.1834	44.80	36.90	20	5.5	02.10.1971	44.80	42.10	3	4.5
04.05.1865	45.20	39.50	20	4.5	03.09.1978	44.40	38.00	20	5.5
08.07.1870	43.60	39.90	13	5.3	01.02.1994	44.68	39.96	4	4.2
15.03.1873	44.50	40.10	10	4.0	15.02.1994	44.26	39.66	10	4.4
09.10.1879	45.15	37.90	25	5.7	25.09.1995	44.47	41.33	14	4.7
18.08.1896	45.40	39.20	10	4.7	19.10.1999	44.70	42.68	13	4.4
21.10.1905	43.30	41.70	35	6.4	22.05.2001	46.36	42.32	9	4.7
19.08.1908	44.60	40.20	18	4.6	09.11.2002	45.12	37.84	28	4.8
04.06.1909	44.50	40.10	14	4.4	15.11.2004	44.18	39.71	15	4.9
15.11.1909	45.10	42.10	8	4.0	07.09.2009	42.55	43.47	12	5.7
19.04.1926	45.30	39.10	20	5.4	02.05.2012	44.75	41.66	7	4.0
01.06.1947	44.90	42.00	3	3.5	10.12.2012	44.81	37.54	31	4.2
23.11.1947	45.30	43.20	3	3.5	15.12.2012	44.37	42.46	14	4.2
12.11.1954	43.90	40.90	17	4.6	03.11.2015	44.70	41.59	5	4.1
21.12.1955	43.60	40.10	4	4.3	30.10.2016	44.20	39.61	18	4.1
25.09.1959	44.00	39.40	6	4.5	15.04.2018	46.47	41.01	9	3.2
16.07.1963	43.25	41.58	5	6.4	01.07.2021	45.09	40.60	13	3.1
12.07.1966	44.70	37.30	20	5.8	29.10.2022	44.80	39.83	10	3.6

[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 // Материалы конференции, (г. Воронеж, 25—30 сентября 2016 г.) / под ред. Н. М. Чернышова, Л. И. Надежка. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. С. 117–122].



Сводная карта изосейст сильнейших землетрясений Северо-Западного Кавказа. Составлена с использованием данных А.А. Никонова

$$I = 1.6M - 3.10(\pm 0.08) \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 2.42(\pm 0.29)$$

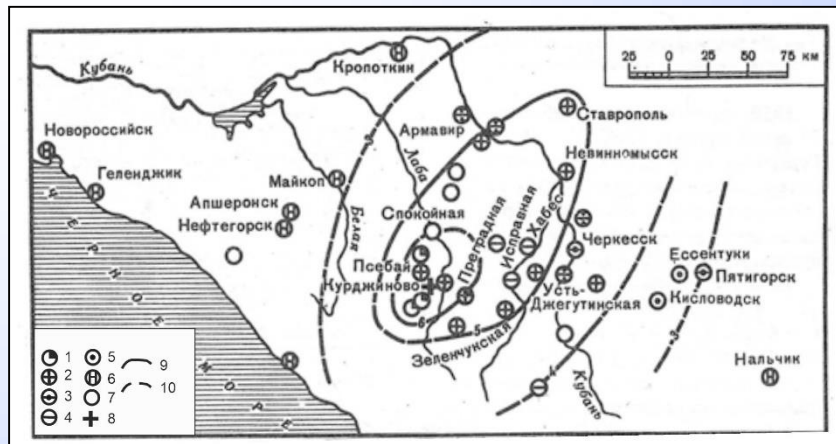


21 EQ,
N=498

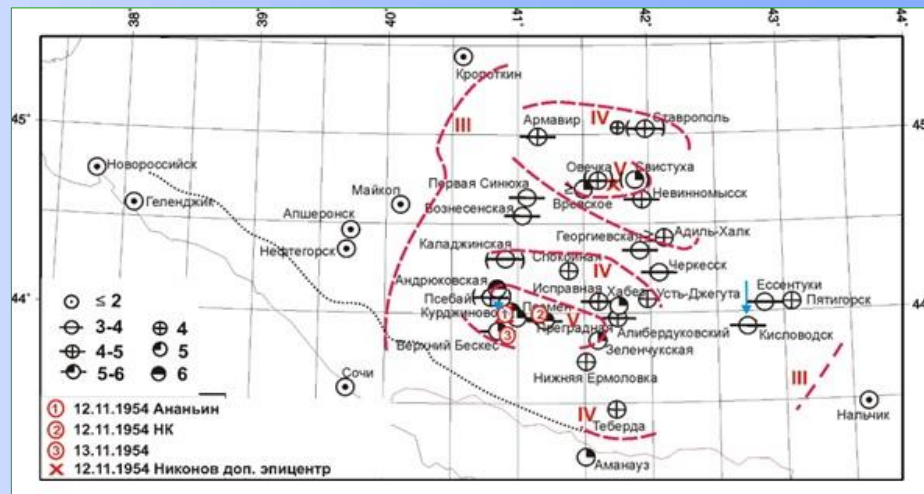


Дягилев Р.А. IMReq. Утилита для расчета параметров макросейсмического поля. Свидетельство о государственной регистрации программа для ЭВМ №2018610156 от 09.01.2018. ФИЦ ЕГС РАН, 2018

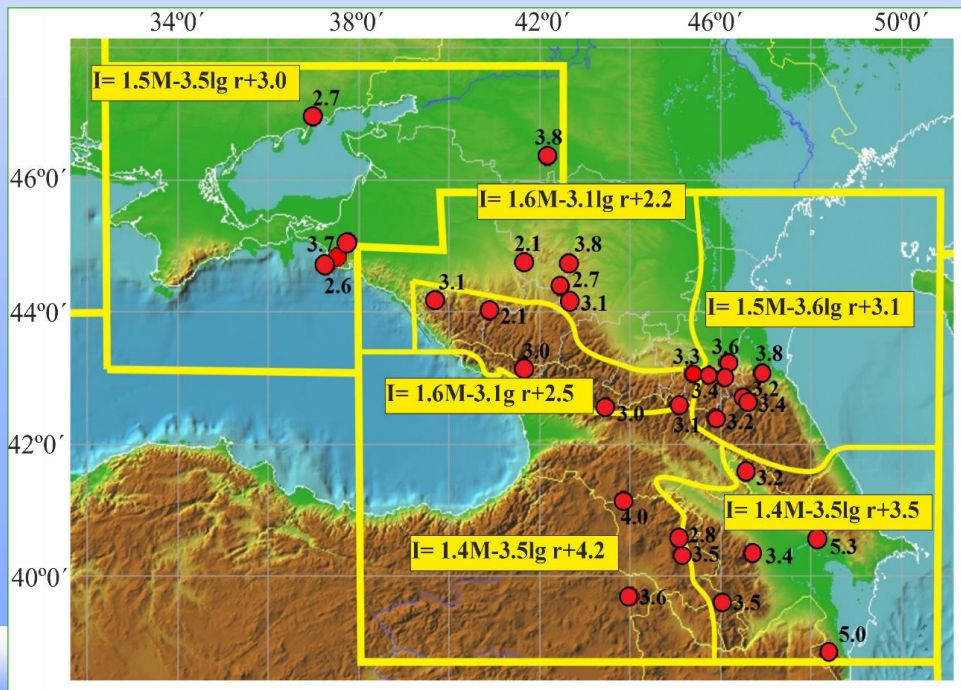
Карты изосейст сильнейших землетрясений Северо-Западного Кавказа и результаты калибровки макросейсмического поля для разных регионов Северного Кавказа



Карта изосейст землетрясения 12.11.1954 г. (по [Ананьин, 1977]) 1–7 – интенсивность в населенных пунктах: 1 – 6 баллов, 2 – 5 баллов, 3 – 4–5 баллов, 4 – 4 балла, 5 – 3–4 балла, 6 – землетрясение не ощущалось, 7 – ощущалось с неизвестной балльностью; 8 – эпицентр; 9 – изосейсты высших баллов с уверенным построением; 10 – изосейсты с неуверенным проведением



Новая схема изосейст землетрясения 12.11.1954 г. по А.А. Никонову 1 – эпицентр землетрясения по [Ананьин, 1977]; 2 – эпицентр афтершока 13.11.1954 г. по данным [Новый..., 1977]; 3 – эпицентр землетрясения 12.11.1954 г. по данным [Новый..., 1977]; 4 – положение эпицентра, добавленного А.А. Никоновым [Габсатарова и др., 2016]; 5 – изосейсты, римские цифры – балльность



Положения эпицентров землетрясений в рамках регионов Па (Крым и Нижняя Кубань) и Пб (Кавказ, с подразделением на районы Северного Кавказа, Большого Кавказа, Дагестана, Закавказья и Азербайджана) (по [Фролова и др., 2019]) 1 – эпицентры землетрясений, указаны полученные для них коэффициенты затухания γ ; 2 – уравнения (1) для отдельных районов (по [Шебалин Н., 1977])

Актуализация застройки городов Краснодарского края на основе использования методов искусственного интеллекта

использована информация с сайта “Реформа ЖКХ” (<https://www.reformagkh.ru>) о материале несущих стен и перекрытий в многоквартирных домах, количестве этажей, квартир и подъездов в доме и численности жителей; дополнительно совместно обработаны космические снимки и фотографии сервиса “Панорамы” компании Яндекс

Обучение нейросети и классификация объектов

Для обучения нейросети были созданы категории, которые совпадают с классификацией типов зданий по шкале MMSK-86: А, Б, В, С7, С8, и на основе этих категорий были сформированы наборы изображений

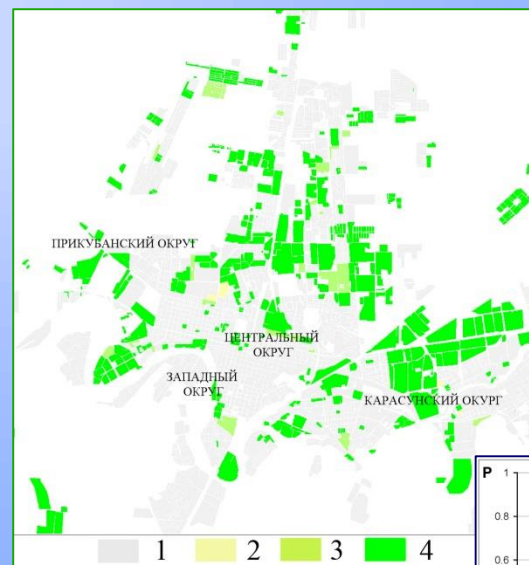
Материал несущих стен	Год	Тип по шкале MMSK-86			Адрес здания/изображение
		Материал перекрытий			
		Дерево	ЖБ	Монолит	
Кирпич	1956-1982	В			
Кирпич	1956-1982		С7		

Использование обученной нейронной сети значительно сокращает время на построение модели застройки населенного пункта

Оценка качества обучения - 90%

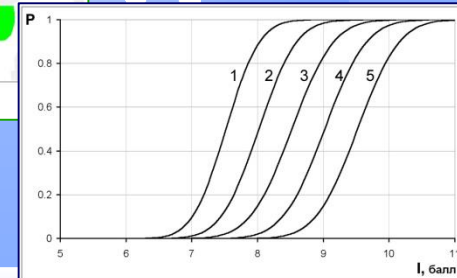
Программный код, созданный на основе обучения нейросети, интегрирован в приложение системы «Экстремум»

Поквартальное распределение зданий типа С7 по шкале MMSK-86 для г. Краснодара



- 1 – нет зданий типа С7;
- 2 – менее 20 %;
- 3 – 20–50 %;
- 4 – более 50 %

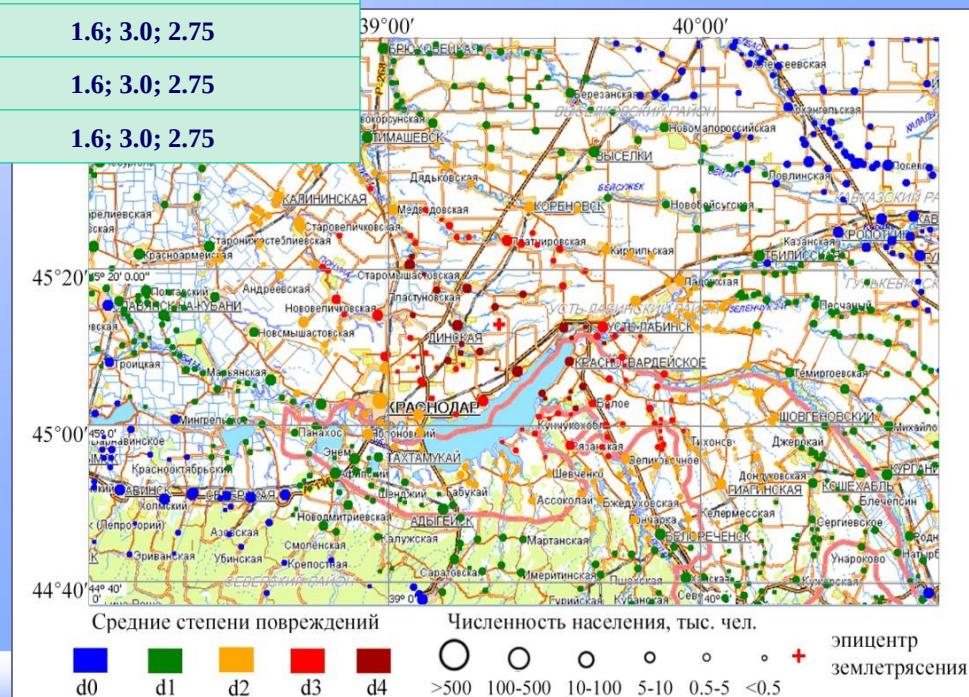
Функции уязвимости



Варианты исходных данных для расчета последствий сценарных землетрясений вблизи г. Краснодара

№ №	Координаты	Магнитуда М	Глубина h, км	Коэффициенты уравнения макросейсмического поля
1	45.21° N; 39.36°E	5.8	20	1.5; 3.5; 3.0
2	45.21° N; 39.36°E	5.8	15	1.5; 3.5; 3.0
3	45.21° N; 39.36°E	5.5	17	1.5; 3.5; 3.0
4	45.21° N; 39.36°E	5.5	3	1.5; 3.5; 3.0
1a	45.21° N; 39.36°E	5.8	20	1.6; 3.1; 2.2
2a	45.21° N; 39.36°E	5.8	15	1.6; 3.1; 2.2
3a	45.21° N; 39.36°E	5.5	17	1.6; 3.1; 2.2
4a	45.21° N; 39.36°E	5.5	3	1.6; 3.1; 2.2
1aa	45.21° N; 39.36°E	5.8	20	1.6; 3.0; 2.75
2aa	45.21° N; 39.36°E	5.8	15	1.6; 3.0; 2.75
3aa	45.21° N; 39.36°E	5.5	17	1.6; 3.0; 2.75
4aa	45.21° N; 39.36°E	5.5	3	1.6; 3.0; 2.75

Результаты моделирования
последствий сценарного
землетрясения (вариант 3a) с
помощью системы «Экстремум»



Последствия сценарных землетрясений в Краснодарском крае вблизи г. Краснодара

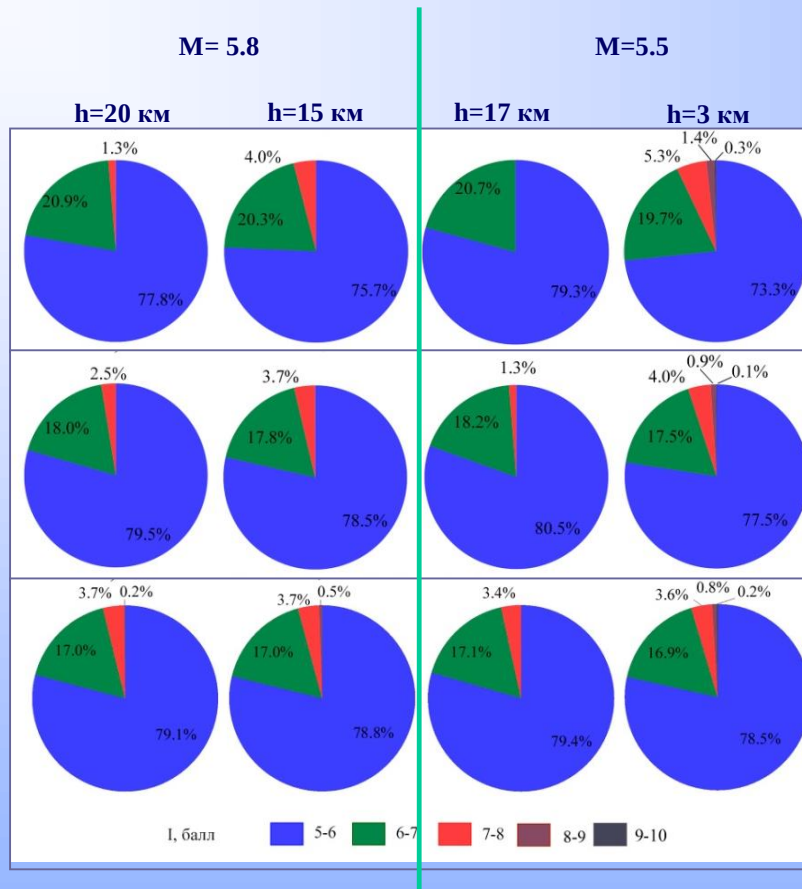
ПЛОЩАДИ РАСЧЕТНЫХ ИЗОСЕЙСТ РАЗНЫХ БАЛЛОВ

Коэффициенты уравнения
макросейсмического поля

1.5; 3.5; 3.0

1.6; 3.1; 2.2

1.6; 3.0; 2.75



Площадь изосейст интенсивностью I=5-6 баллов варьирует от 75 до 80% подверженной территории

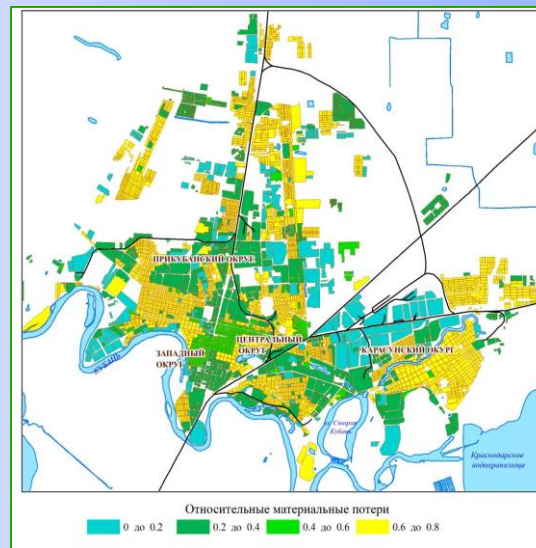
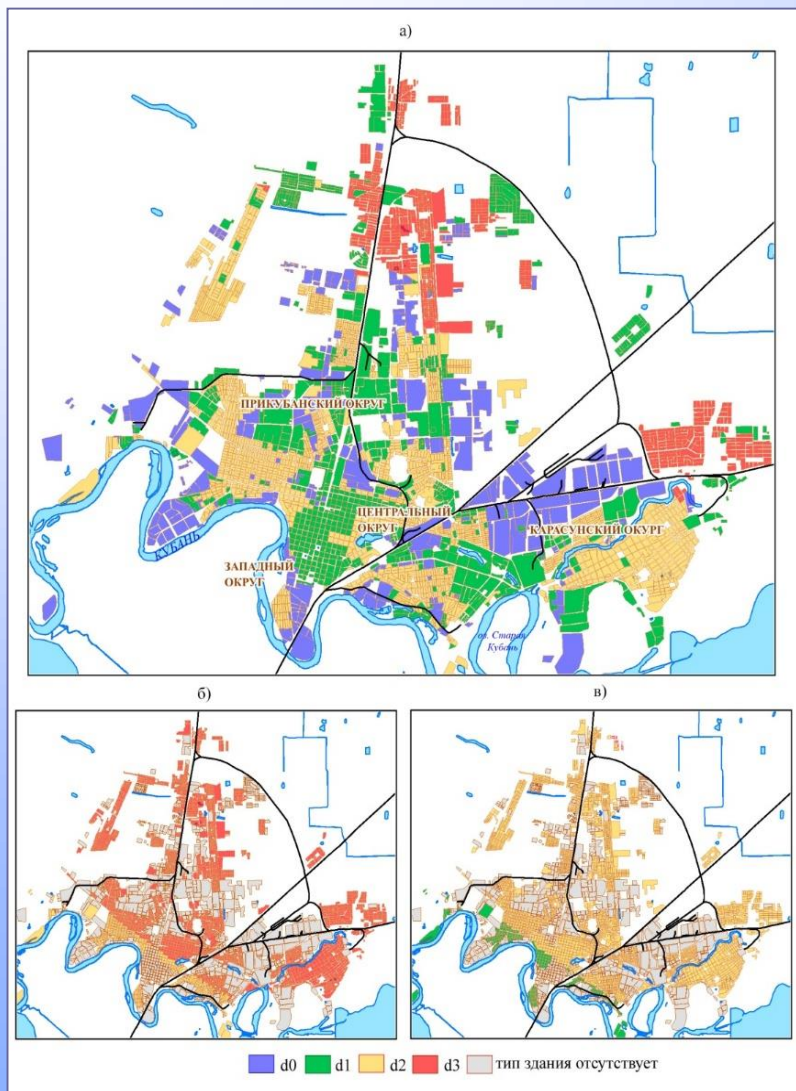
Площадь изосейст интенсивностью I=6-7 баллов составляет от 17 до 21% территории. При уменьшении глубины очага происходит изменение площади изосейст интенсивностью I=7-8 баллов и появляются изосейсты с интенсивностью I=8-9 баллов и более

Изменение коэффициентов в уравнении макросейсмического поля может привести к увеличению площади зон с высокой интенсивностью

Влияние магнитуды перевешивает влияние глубины очага

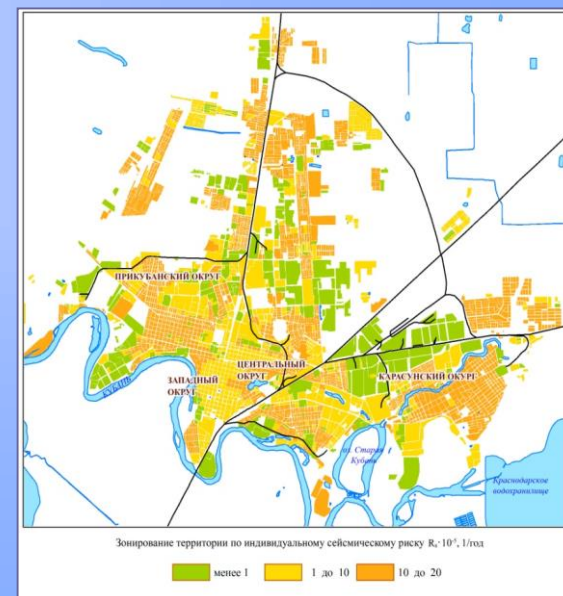


Распределение расчетных степеней повреждений для разных типов зданий от сценарного события для г. Краснодара



Карта экономической
уязвимости г.
Краснодара в
относительных
единицах

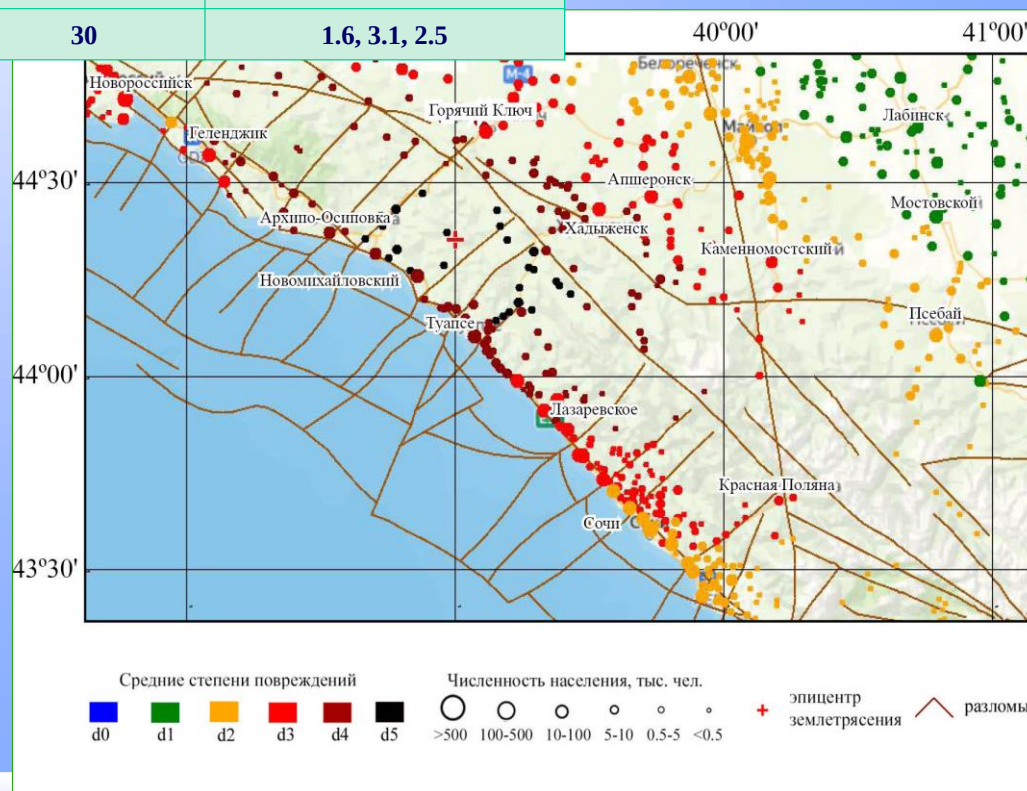
Карта
индивидуального
сейсмического риска
 R_{s1} для территории
г. Краснодара



Варианты исходных данных для расчета последствий сценарных землетрясений вблизи г. Туапсе

№№	Координаты	Магнитуда М	Глубина h, км	Коэффициенты уравнения макросейсмического поля
1	44.35° N; 39.00°E	6.8	30	1.6, 3.1, 2.2
2	44.35° N; 39.00°E	6.8	30	1.6, 3.1, 2.5
3	44.35° N; 39.00°E	6.8	30	1.5, 3.1, 2.23
4	44.26° N; 39.34°E	6.5	30	1.6, 3.1, 2.5
5	44.2° N; 39.36°E	6.5	30	1.6, 3.1, 2.5
6	44.21° N; 39.43°E	6.5	30	1.6, 3.1, 2.5
7	44.1° N; 39.1°E	6.5	30	1.6, 3.1, 2.5
8	44.40° N; 38.00°E	6.5	30	1.6, 3.1, 2.5

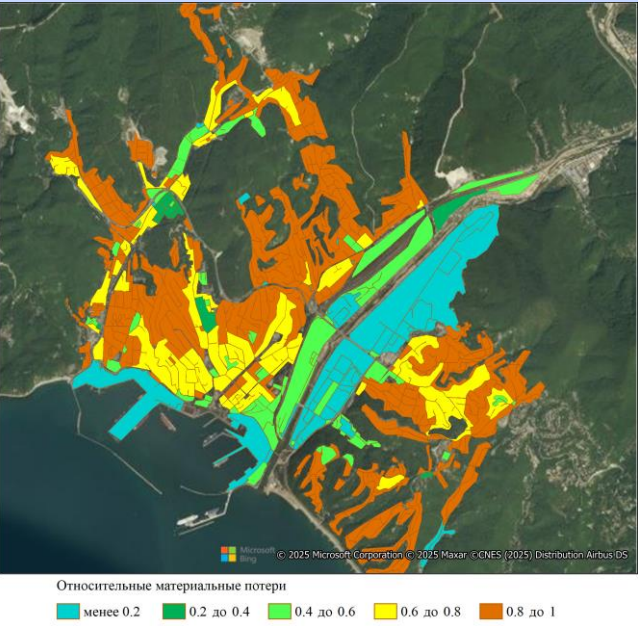
**Результаты моделирования
последствий наиболее опасного
сценарного события в зоне ВОЗ
вблизи г. Туапсе с $M=6.8$, $h=30$ км
(вариант 3) с помощью системы
«Экстремум»**



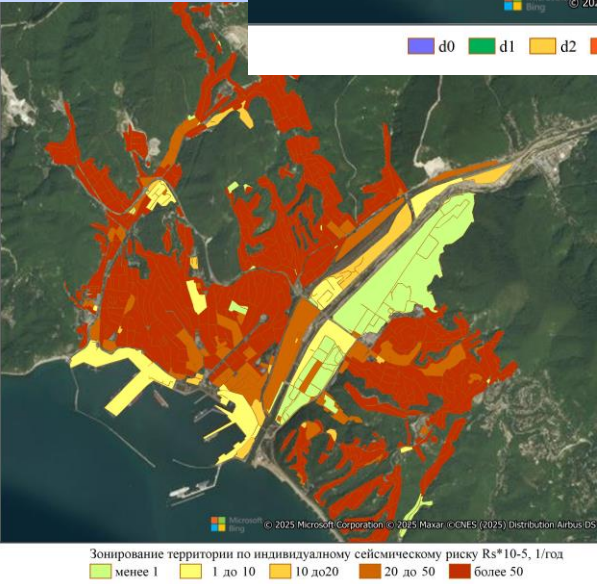
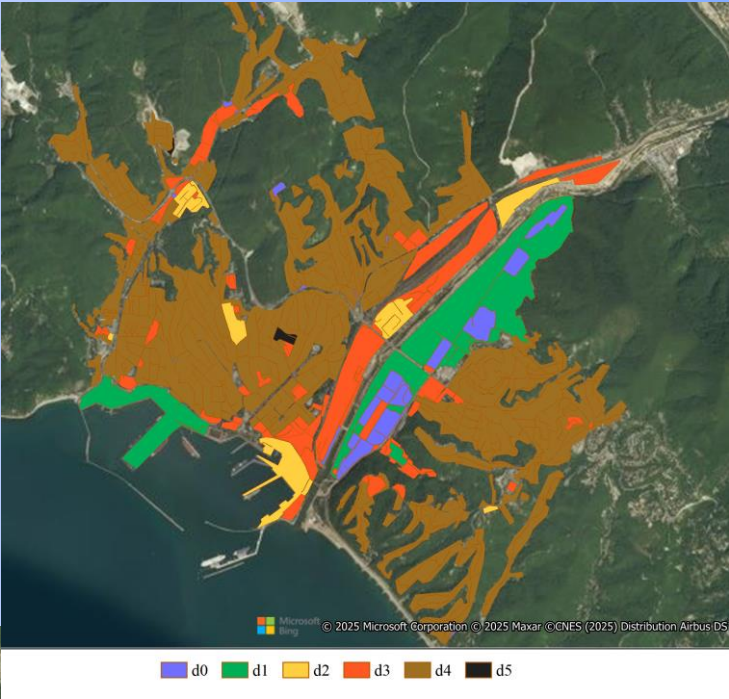
Средние степени повреждения застройки в г. Туапсе для разных вариантов исходных данных для сценарных событий

Варианты	Δ, км	Распределение степеней повреждений для разных типов зданий, d _{ср}			
		Тип А	Тип Б	Тип В	Тип С7
Событие 15.02.1994 г. с М=6.5	30.9	4	3	2	1
Событие 21.07.1936 г. М=6.5	2.1	5	4	3	2
Событие 03.09.1978 г. М=6.5	91.6	3	2	1	0

Карта экономической уязвимости г. Туапсе в относительных единицах



Распределение расчетных степеней повреждений для разных типов зданий в г. Туапсе для сценарного события 21.07.1936



Карта индивидуального сейсмического риска R_{s1} для территории г. Туапсе

ВЫВОДЫ

С помощью системы «Экстремум» выполнены оценки последствий сценарных событий в наиболее опасных зонах ВОЗ вблизи г. Краснодара и г. Туапсе с высокими значения индивидуального сейсмического риска; в качестве параметров сценарных событий использовались также исторические события 1936, 1978 и 1994 гг. и результаты палеосейсмологических исследований

Совместно с ФИЦ ЕГС РАН на основе на данных макросейсмических проявлений после 21 землетрясения с $M \geq 4$ с эпицентрами на территории Краснодарского края и ближайшего окружения откалиброваны модели затухания сейсмической интенсивности системы «Экстремум» для территории края

Актуализирована информация о застройке г. Краснодара, г. Туапсе на основе использования методов искусственного интеллекта и записей в базе данных комплекса о последствиях землетрясений, включая материалы ДЗЗ, ГИС «Реформа ЖКХ» и сервиса «Панорамы» компании Яндекс



Полученные с использованием откалиброванных моделей затухания сейсмической интенсивности и актуализированной информации о застройке результаты оценки возможных сценарных событий в Краснодарском крае для г. Краснодара и г. Туапсе свидетельствуют о важности мероприятий по понижению уровня риска и дальнейшему мониторингу уровня сейсмической опасности и уязвимости элементов риска для разработки управленческих решений по повышению устойчивости урбанизированных территорий

С учетом активного развития территории края и составления планов генерального развития городов, в первую очередь столицы края г. Краснодара и курортных городов Черноморского побережья, характеризующихся высоким уровнем сейсмической опасности, необходимо продолжение работ по уточнению особенностей затухания интенсивности в разных районах края, дальнейшая актуализация моделей застройки населенных пунктов и функций уязвимости типовой застройки Краснодарского края

Результаты моделирования последствий сценарных событий для г. Краснодара и г. Туапсе отражают методические подходы для расчета возможных ущерба и потерь от сценарных землетрясений, которые могут быть использованы для других сейсмоопасных районов страны в целях обеспечения безопасности населения и территорий

