

УДК 624.131.1:551.252

Моделирование последствий Учтурфанского землетрясения с $M_w=7.0$ 22.01.2024 г. с использованием информационной системы «Экстремум»

© 2024 г. Н.И. Фролова¹, Н.С. Малаева^{1,2}, С.П. Суцев³

¹ИГЭ РАН, г. Москва, Россия; ²ФГБУ ВНИИ ГО ЧС (ФЦ), г. Москва, Россия;

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 26.07.2024 г.

Аннотация. Решается задача учёта региональных особенностей затухания сейсмической интенсивности на территории Тянь-Шаня при моделировании последствий Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 года. Актуальность исследования определяется необходимостью получения оперативных и надёжных оценок возможных потерь от землетрясений для поддержки принятия решения о реагировании с учётом наиболее пострадавших населённых пунктов. Целью исследования является калибровка модели макросейсмического поля системы «Экстремум» для приграничной территории Китая и Кыргызстана. Впервые для рассматриваемой территории выполнен анализ применимости уравнений затухания сейсмической интенсивности, полученных исследователями в разные годы и в разных странах, для оперативной оценки возможных последствий сильных событий. Изучено влияние коэффициента сжатия эллипса k и параметров очага сильного события, определённых разными сейсмологическими службами в оперативном режиме, на результаты моделирования затухания сейсмической интенсивности. Для оценки возможных последствий землетрясения 22 января 2024 года применены методы имитационного компьютерного моделирования с использованием системы «Экстремум», разработанной с участием авторов данной статьи. Система позволяет моделировать возможные последствия в течение 20–40 мин после определения параметров землетрясения. Приводятся результаты моделирования последствий Учтурфанского землетрясения, даётся оценка сходимости расчётных и наблюдаемых интенсивностей для различных уравнений затухания интенсивности, полученных ранее для Китая, Кыргызстана и сопредельных территорий в области Гиссаро-Кокшаальского разлома Тянь-Шаня.

Ключевые слова: оперативная оценка потерь, информационная система «Экстремум», калибровка модели, макросейсмическое поле, Учтурфанское землетрясение.

Для цитирования: Фролова Н.И., Малаева Н.С., Суцев С.П. Моделирование последствий Учтурфанского землетрясения с $M_w=7.0$ 22.01.2024 г. с использованием информационной системы «Экстремум» // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 3. – С. 60–76. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.3.04>. – EDN: TLSPQJ

Введение

Оперативная оценка ожидаемых потерь от произошедшего землетрясения, выполняемая с применением автоматизированных информационных систем, позволяет принять быстрое и эффективное решение о проведении поисково-спасательных работ, эффективность которых зависит от точности и надёжности прогноза параметров обстановки в зоне чрезвычайной ситуации (ЧС).

В настоящее время известны три глобальные системы, позволяющие оценивать возможные

последствия землетрясений в масштабе времени, близком к реальному. Система «Экстремум» – одна из таких систем. Её первая версия для моделирования потерь от землетрясений в сейсмоактивных регионах мира в оперативном режиме была разработана в 1990-х годах. За более чем 20-летний период созданы различные версии системы, в том числе для отдельных сейсмоопасных регионов России и сопредельных стран.

Базы данных системы «Экстремум» и её математические модели, используемые для моделирования интенсивности сотрясений, повреждений зданий и сооружений, числа погибших

и раненых, регулярно обновляются. Модели имитации и базы данных, а также вопросы надёжности обсуждаются в работах [Ларионов и др., 2017; Фролова др., 2018а; Frolova et al., 2017]. Основными показателями и мерами риска в системе «Экстремум» являются: распределение степени повреждения зданий различных типов, классифицированных по шкале ММСК-86 [Шебалин и др., 1986], для всей пострадавшей территории и для каждого населенного пункта; ожидаемое число погибших и пострадавших (в разной степени или по разным уровням) для всей пострадавшей территории и для каждого населенного пункта; характеристики загруженности автомагистралей и общая протяжённость заблокированных дорог; ожидаемое число произошедших («вторичных») техногенных аварий в пострадавшей территории.

Анализ большого числа результатов применения системы «Экстремум» для территории РФ и других стран в оперативном и ретроспективном режимах позволил установить факт зависимости точности и надёжности оценок параметров обстановки в зоне ЧС, обусловленной сильным землетрясением, от значительного числа факторов [Фролова и др., 2018а; 2018б; 2018в; Frolova et al., 2017].

Факторы были разделены на три большие группы [Фролова и др., 2018в]:

1 – «очаг» – группа, включающая возможные ошибки координат эпицентра, глубины, магнитуды, описания механизма очага, в том числе ориентацию разрыва в очаге;

2 – «поле» – группа, включающая неточности в описании анизотропии макросейсмического поля, проявляющиеся в некорректном учёте изменчивости затухания интенсивности вдоль и вкrest горных структур, а также протяжённости очагов;

3 – «уязвимость» – группа, характеризующая погрешности её математического описания для элементов риска (зданий и сооружений, населения).

В настоящей статье, не принижая значения групп факторов «очаг» и «уязвимость», основное внимание уделяется исследованию параметров группы факторов «поле».

Учёт региональных особенностей затухания сейсмической интенсивности при оперативной оценке потерь рассматривался ранее в публикациях [Фролова и др., 2015; 2018а; 2018б; 2018в]. На ряде примеров для отдельных землетрясений мира, стран СНГ и России показано, что калибровка моделей даёт значительный эффект повышения точности и надёжности результа-

та при оперативной оценке потерь от землетрясений. Принимая данный факт во внимание, различные исследователи стремятся организовать международное сотрудничество для сбора и обобщения калибровочной информации, в качестве которой особую ценность представляют результаты полевых обследований районов сильных землетрясений, в том числе макросейсмическая информация.

Последние годы активизировались работы по созданию баз данных (БД), содержащих макросейсмическую информацию. Для уточнения наблюдаемого эффекта, в первую очередь для удалённых населённых пунктов, используются процедуры пересчёта динамических параметров колебания грунта в интегральную описательную характеристику – балл сейсмической интенсивности в соответствии с конкретной шкалой интенсивности для населённого пункта [Li, 2024].

Объектом настоящего исследования является Учтурфанское землетрясение 22 января 2024 г. с $M_w=7.0$.

Целью исследования является калибровка модели макросейсмического поля системы «Экстремум» для приграничной территории Китая и Кыргызстана. Впервые для рассматриваемой территории выполнен анализ применимости уравнений затухания сейсмической интенсивности, полученных исследователями в разные годы и в разных странах, для оперативной оценки возможных последствий сильных событий.

Для выполнения численных экспериментов применены методы имитационного компьютерного моделирования с использованием системы «Экстремум», разработанной с участием авторов данной публикации.

Сейсмичность и сейсмическая опасность Центрального Тянь-Шаня

Учтурфанское землетрясение 22 января 2024 г. с $M_w=7.0$ произошло в Тянь-Шаньской сейсмической зоне (Т-ШСЗ), которая является одной из наиболее сейсмоактивных зон территории континентальной части Евразии. Т-ШСЗ включает значительную часть Центрального Тянь-Шаня, ограниченную координатами $40.5-44.0^\circ\text{N}$ и $74.0-79.0^\circ\text{E}$.

Большую часть территории занимают горные хребты, образованные палеозойскими и докембрийскими породами. Высота многих гор превышает 5000 м, а наивысшая точка – Пик Победы – достигает 7439 м. Горные массивы и впадины разделены зонами глубинных разломов, которые

в основном тянутся в восточном–северо-восточном направлении. Самые крупные из них – Северо-Тяньшаньский, Заилийский, Кемино-Чиликский, Линия Николаева, Атбашский и др. [Пржиялговский и др., 2022].

Геосинклинальный этап развития в этом районе закончился в конце герцинского периода. В течение мезозоя и большей части палеогена образовавшаяся платформа испытывала незначительные дифференцированные движения. Активизация тектонических процессов произошла в олигоцене, наибольшая их интенсивность имела место в конце неогена – четвертичном периоде [Крестников и др., 1979].

Тянь-Шаньская сейсмическая зона характеризуется умеренными и сильными землетрясениями. Всего за период 1896–2010 гг. в Т-ШСЗ зарегистрировано 22 землетрясения с $M \geq 6.5$ (рис. 1).

В этой зоне за последние 135 лет произошло несколько катастрофических землетрясений с $M > 8.0$: Чиликское 1889 г., Кеминское 1911 г. и землетрясение в Кашгарии, в 1902 году.

В 1992 г. произошло катастрофическое Суусамырское землетрясение с $M_w = 7.3$. Его очаг приурочен к дизъюнктивному узлу пересечения разломов близширотной Тянь-Шаньской (Арамсуйский взбросо-сдвиг) и северо-западной Таласо-Ферганской (Ичкелетау-Суусамырский сдвиг) ориентации.

По данным [Шерман, 2014] и уточнённого каталога землетрясений [Bondar et al., 2023] в этом районе более 30 лет не было сильных землетрясений с $M_w \geq 7.0$.

Анализ многолетних данных за XX в. и начало XXI в., проведённый в работе [Мамыров и др.,

2011], позволил выявить четыре главных периода изменения сейсмического режима горноскладчатой системы Тянь-Шаня длительностью 34–36 лет. Каждый период разделён на фазы активизации (18–19 лет), во время которых происходит шесть-восемь катастрофических землетрясений с $K = 16–18$ и $M_w \leq 6.6$. Эти фазы сменяются снижением сейсмической активности, длительностью 15–18 лет, когда каждый год проявляются землетрясения с $K = 12.8–15.5$ и $M_w = 5.2–6.5$. В статье [Мамыров и др., 2011] делается предположение о том, что с 2008 г., после Нура-Алайского землетрясения 5 октября 2008 г., началась IV фаза проявления крупных сейсмодкатастроф, которая, вероятно, продлится до 2025 года. В периоды активизации разрушительные землетрясения проявляются по всей территории горной системы Тянь-Шаня. Наиболее сейсмоопасными являются зоны активных разломов Гиссаро-Кокшаальской системы, где и произошло Учтурфанское землетрясение.

Согласно работе [Мамыров, 2014], на основе использования метода сейсмических брешей при исследованиях по средне- и долгосрочному прогнозу землетрясений на территории Кыргызстана и сопредельных стран были построены серии карт районов ожидаемых землетрясений (РОЗ). В 1994 г. была составлена первая карта вероятной сейсмической опасности территории Кыргызстана (прогноз на 10–15 лет), где были выделены РОЗ. Эта карта была использована Министерством по чрезвычайным ситуациям Кыргызской Республики для планирования превентивных защитных мероприятий.

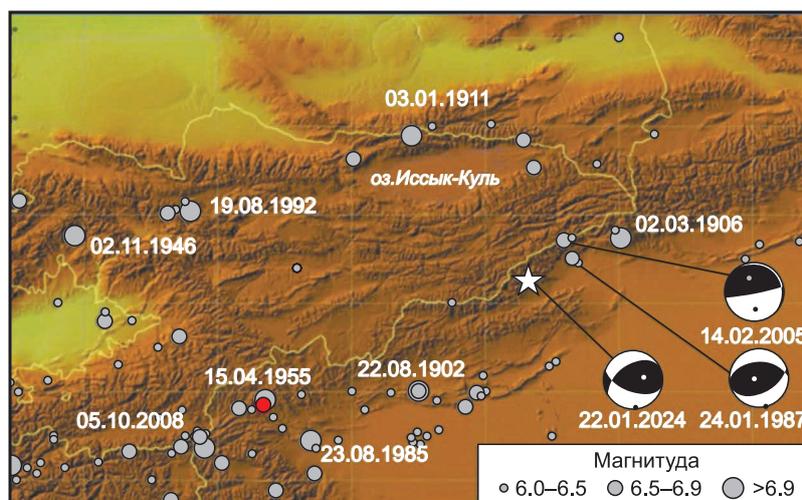


Рис. 1. Сильнейшие землетрясения Кыргызстана и Северо-Западного Китая [Соколова и др., 2024].

Показаны диаграммы механизмов очагов землетрясений в области Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. по данным GCMТ [Global CMT, 2024; Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012]

В последующем эта карта обновлялась (2002 и 2011 гг.) после крупных землетрясений. Авторы отмечают, что эпицентры всех разрушительных и сильных землетрясений, таких как Кошдобинское (1997 г.), Куюкапское (2005 г.), Кочкорское (2006 г.), Лейлякское (2007 г.), Нура-Алайское (2008 г.), Каджисайское (2014 г.), Канское (2011 г.), Сарыджазское (2013 г.), Талдыкское (2015 г.) и Кызылартское (2016 г.), попадают на площади РОЗ, выделенные на картах долгосрочного (1994 г.) и среднесрочного (2002 г., 2008–2009 гг., 2011 г.) прогнозов.

Учтурфанское землетрясение произошло в выделенной Кайчинской зоне, относящейся, по классификации [Мамыров, 2014], ко II категории с $K=12.6-14.5$ и $I=5-6$ баллов, расположенной на границе Китая и Кыргызстана.

В Китае в последние годы также активно проводятся работы по уточнению вероятностной оценки сейсмической опасности территории материковой части Китая [Shao et al., 2020; Shao et al., 2022] и прилегающих территорий. В работе [Xu et al., 2023] на основе использования новой модели очага и уточнённых данных по активным разломам выполнена прогнозная оценка уровня сейсмичности на 2021–2030 гг. для пяти сейсмических зон территории материкового Китая, включающих 29 сейсмических поясов со схожими характеристиками геологического строения и сейсмичности.

Авторами с вероятностью превышения 10% и 2% за 50 лет были сформированы оценки опасности для 118500 площадок с разными грунтовыми условиями на территории Китая.

Полученные результаты имеют частичное сходство и некоторые отличия по сравнению с ранее выполненными оценками опасности с применением других моделей очага [Zhou et al., 2013]. Авторы выделяют отдельные районы повышенной сейсмической опасности с вероятностной оценкой на ближайшие годы. По их оценкам, такие районы, в частности, находятся в Тянь-Шаньском сейсмическом поясе, где и произошло землетрясение 22 января 2024 года. Кроме того, предполагается использование полученных результатов в качестве основы для разработки политики предотвращения землетрясений и смягчения их последствий для материкового Китая.

Таким образом, анализ имеющейся в нашем распоряжении информации по оценке сейсмической опасности территории Кыргызстана и материкового Китая показывает, что район землетрясения 22 января 2024 г. был отнесён к одному из наиболее сейсмоопасных районов на территории Центрального Тянь-Шаня.

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 [Ларионов и др., 2017].

В статье приводятся результаты моделирования последствий Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. с $M_w=7.0$ на границе Китая и Кыргызстана.

Моделирование последствий Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. с $M_w=7.0$ на границе Китая и Кыргызстана

Землетрясение 22 января 2024 г. произошло на территории Китая в уезде Уши (Учтурфан) округа Аксу, недалеко от границы с Кыргызстаном. Толчки ощущались во многих странах Центральной Азии: на территории Китая, Кыргызстана, Казахстана, Таджикистана, Узбекистана, также на территории Российской Федерации, Индии и Пакистана.

Интенсивность в эпицентре по предварительным оценкам Института сейсмологии НАН КР $I_0=8$ баллов по 12-балльной шкале MSK-64 [Медведев и др., 1965]. Согласно отчёту [China Earthquake ..., 2024], Сейсмологическая администрация Китая (China Earthquake Administration, SEA) провела «полевые работы по обследованию землетрясений». Эти исследования показали, что 9-балльная изосейста (согласно 12-балльной «Китайской шкале интенсивности землетрясений» GB/T 17742-2020 [Chinese seismic ..., 2020]) занимает площадь 252 км². Внутри 9-балльной изосейсты оказались два посёлка уезда Акчи. За основным толчком последовали многочисленные афтершоки.

Моделирование последствий землетрясений проводится для принятия решения о проведении спасательных операций в первые часы после события (в течение 20–40 мин после определения параметров землетрясения).

Точность оперативного прогноза последствий существенно повышается, если для данной сейсмоопасной территории заблаговременно определён рейтинг различных сейсмологических служб и будут подобраны параметры зависимости, описывающей особенности затухания сейсмической интенсивности I_i , а также региональные особенности поведения элементов риска.

Результаты исследований, выполненных ранее авторами статьи, позволили разработать процедуру калибровки макросейсмического поля для выделения границы зон с «квазиустойчивыми» параметрами макросейсмического поля, к которым следует отнести:

- коэффициенты уравнения макросейсмического поля;
- отношение большой b и малой a осей эллиптических изосейст высших баллов (коэффициент сжатия k);
- угол, задающий ориентацию макросейсмического поля, в частности азимут большой оси эллипса вытянутости изосейст.

В соответствии с процедурой, на первом этапе рассматриваются три уравнения затухания сейсмической интенсивности, предложенные разными авторами, изучающими данный регион.

Два уравнения, предложенные К.Д. Джанузаковым для Северного и Центрального Тянь-Шаня [Джанузаков, 2013]: средние значения с учётом размера очага (1), и вдоль структур с учётом размера очага (2):

$$I = 1.5 \cdot M - 3.8 \cdot \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3.4, \quad (1)$$

$$I = 1.5 \cdot M - 3.6 \cdot \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3.3, \quad (2)$$

Также рассматривалась система уравнений (3) для затухания интенсивности в направлениях большой (I_a) и малой (I_b) полуосей для западного Китая [Хи, 2021]:

$$I_a = 1.538 \cdot M - 2.109 \cdot \ln(\Delta + 25) + 5.643,$$

$$I_b = 1.363 \cdot M - 1.494 \cdot \ln(\Delta + 7) + 2.941, \quad (3)$$

где Δ – эпицентральное расстояние, км; h – глубина очага, км; M – магнитуда землетрясения, аналог MLH или M_s .

Для обоснования ориентации макросейсмического поля и коэффициента сжатия k были использованы данные о 21 событии в провинции Синьцзян, Китай (рис. 2а), произошедшем на границе Китая и Кыргызстана с 1969 по 2020 г. с наблюдаемой интенсивностью в диапазоне $V < I_0 \leq IX$ [Xia et al., 2023], и зависимости, предложенные К.М. Мирзоевым и К.Д. Джураевым [Мирзоев и др., 1985]. Также рассматривались карты изосейст землетрясений с $M \geq 4.6$ на территории Кыргызской Республики (рис. 2б) с интенсивностью сотрясений в эпицентре 6 и более баллов, разработанные в ИС НАН КР [Гребенникова, 2015].

Выполненная обработка пространственных данных позволила сделать вывод о преобладающей ориентации большой оси изосейст вдоль основных геологических структур.

Анализ эмпирических данных и закономерностей, предложенных К.М. Мирзоевым [Мирзоев и др., 1985] для Средней Азии, позволил обосновать два значения коэффициента сжатия k , равные 2.0 и 3.0, для моделирования последствий Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 года.

Учитывая возможные погрешности в определении параметров землетрясений службами срочных донесений, моделирование последствий землетрясений, как правило, проводится с использованием данных разных служб: ФИЦ ЕГС РАН (GS RAS), NEIC, EMSC, GCMT и др. В табл. 1 приведены параметры Учтурфанского землетрясения по данным различных сейсмологических служб (рис. 3), которые анализировались в исследовании.

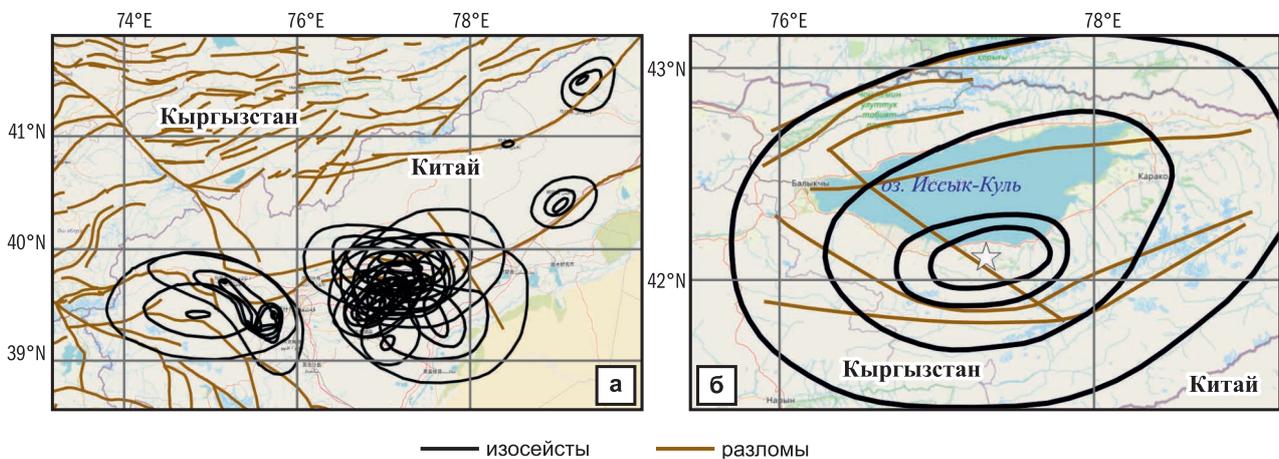


Рис. 2. Сводная карта изосейст: а – по [Xia et al., 2023]; б – по [Гребенникова, 2015]

Таблица 1. Параметры очага землетрясения 22 января 2024 года в Центральном Тянь-Шане по данным оперативных служб

Служба / Агентство	Время в очаге (UTC)	Координаты		M	h , км	Источник
		φ , °N	λ , °E			
GS RAS	18:09:05.1	41.380	78.610	$M_s=7.3$	10	http://www.gstras.ru/new/ssd
USGS	18:09:04	41.269	78.649	$M=7.0$	13	https://earthquake.usgs.gov
NEIC		41.270	78.650	$M_s=7.3$	13	https://earthquake.usgs.gov
EMSC	18:09:04.5	41.304	78.706	$M_w=7.0$	9	https://www.emsc-csem.org/
Geofon	18:09:04.3	41.270	78.700	$M_w=7.0$	10	https://geofon.gfz-potsdam.de/
INGV	18:09:07	41.210	78.701	$M_{wp}=7.0$	10	https://www.ingv.it/
GDACS	18:09	41.269	78.649	$M=7.0$	13	https://www.gdacs.org/
Geoscience Australia		41.455	78.837	$M_{ww}=7.2$	16	https://earthquakes.ga.gov.au/
BGS	18:09:04.5	41.269	78.649	$M=7.0$	13	https://bgs.ac.uk
ИС НАН КР	18:09:04	41.270	78.550	$MPV=6.8$	15	https://seismo.kg
Kazakhstan National Data Center	18:09:05	41.230	78.590	$M_w=7.0$	13	https://knkc.kz
CENC	18:09	41.260	78.630	$M=7.1$	22	https://www.cenc.ac.cn
GCMT		41.500	79.500	$M=7.1$	33	https://www.globalcmt.org

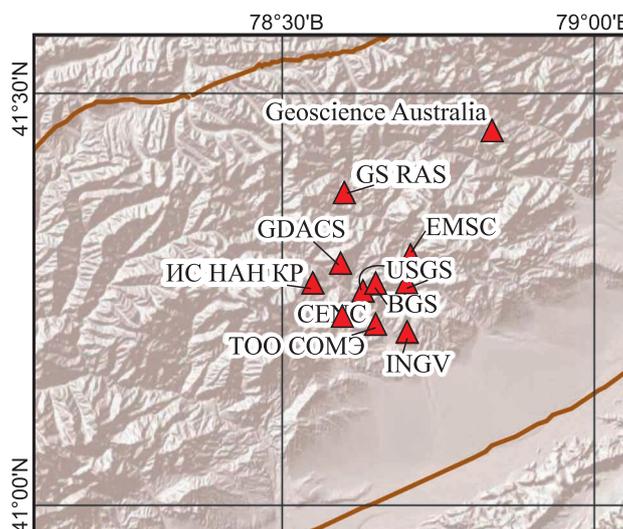


Рис. 3. Положение эпицентра землетрясения 22 января 2024 г. по оперативным данным разных сейсмологических служб

Для исследования применимости уравнений затухания сейсмической интенсивности (1)–(3) для района на границе Китая и Кыргызстана выполнены расчёты последствий для землетрясения 22 января 2024 г. с $M_w=7.0$ в КНР. При выборе вариантов учитывались различные параметры события, определённые Геологической службой США и Сейсмологической администрацией Китая (табл. 1) в оперативном режиме.

Макросейсмическое поле, описанное эллиптическими изосейстами, ориентировалось вдоль разломов [Трифонов и др., 1989], коэффициенты сжатия эллипса были определены как 2 или 3.

Для выбора параметров, которые в случае повторения события могут быть использованы в оперативной оценке потерь, расчётные значения интенсивности I_i необходимо сравнить с наблюдаемыми. В данной работе были обработаны данные различных источников (табл. 2): EMSC (<https://www.emsc-csem.org>), USGS (<https://earthquake.usgs.gov>), CEA (<https://www.cea.gov.cn>), ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.gstras.ru>) и ИС НАН КР (<https://seismo.kg>). Была составлена сводная таблица наблюдаемого макросейсмического эффекта из разных источников, в том числе путём пересчёта параметров инструментальных записей в интенсивность.

Таблица 2. Сводная таблица наблюденного макросейсмического эффекта

№	Пункт	Δ , км	I , балл	Источник
1	Ямансу	37.4	9	CEA
2	Келинсарыг	26.8	9	CEA
3	Учтурфан (Уши)	49.5	8	CEA
4	Яныават	72.5	8	CEA
5	Актокай	53.7	8	CEA
6	Утбаши	36.4	8	CEA
7	Акчий	39.4	8	CEA
8	Сафарбай	32.7	8	CEA
9	Имамлырым	69.3	7	CEA
10	Ярбак	60.8	7	CEA
11	Ачатаг	78.6	7	CEA
12	Сомташ	47.0	7	CEA
13	Акъяр	90.4	6	CEA
14	Тумшук	113.1	6	CEA
15	Вэньсу	134.7	6	CEA
16	Топкан	126.9	6	CEA
17	Чагран	106.8	6	CEA
18	Сахпачи	130.4	6	CEA
19	Айкель	130.0	6	CEA
20	Аксу	136.5	6	CEA
21	Кельпин	90.2	6	CEA
22	Кизык	90.2	6	CEA
23	Пасун	86.4	6	CEA
24	Карачий	74.8	6	CEA
25	Карабулак	103.5	6	CEA
26	Каракол	151.6	6	ИС НАН КР
27	Алма-Ата	267.5	5	USGS
28	Талгар	260.0	5	USGS
29	Иссык	256.7	5	USGS
30	Каскелен	275.8	5	USGS
31	Джалал-Абад	472.1	5	EMSC

Примечание: Данные ФИЦ ЕГС РАН не вошли в окончательный вариант таблицы из-за ограничений на минимальное значение интенсивности в системе «Экстремум».

В табл. 3 и 4 приведены варианты расчётов для разных законов затухания сейсмической интенсивности с использованием обоснованных значений k и ориентации эллиптического поля изосейст вдоль разломов.

Таблица 3. Варианты расчёта последствий землетрясения с использованием параметров очага китайской сейсмологической службы

№	Уравнение макросейсмического поля	Коэффициент сжатия k	Ориентация поля
Вариант 1	(1)	2	Вдоль разломов
Вариант 2	(2)	—"	—"
Вариант 3	(3)	—"	—"
Вариант 4	(1)	3	—"
Вариант 5	(2)	—"	—"
Вариант 6	(3)	—"	—"

Анализ результатов расчётов

Расчёты последствий Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. проводились методом имитационного моделирования с помощью системы «Экстремум».

На рис. 4 приведены результаты моделирования последствий землетрясения 22 января 2024 г. с Mw=7.0 в Китае с помощью системы «Экстремум» для вариантов 1 и 3 (табл. 3). Значками разного размера показаны города с разной численностью населения, цвет значка – средняя степень повреждения застройки в населённом пункте: $d_{cp}=0$ – нет повреждений, $d_{cp}=1$ – лёгкие повреждения; $d_{cp}=2$ – умеренные; $d_{cp}=3$ – тяжёлые; $d_{cp}=4$ – частичные обрушения; $d_{cp}=5$ – обвалы.

Анализ рис. 4а и 4б показывает, что при использовании уравнения (1) (вариант 1, табл. 3) количество населённых пунктов, которые могут получить средние степени повреждений $d_{cp}=3$ и $d_{cp}=4$, увеличивается по сравнению с данными расчёта, полученными при использовании параметров варианта 3 (табл. 2), и появляется $d_{cp}=5$, что соответствует обвалам.

На рис. 5 приведены результаты сравнения наблюдаемых значений (табл. 3) интенсивностей сотрясений I (точки и осредняющая кривая) и расчётных для вариантов, приведённых в табл. 3 и 4.

Анализ рис. 5а показывает систематическое завышение расчётной интенсивности I_i при использовании уравнения (1) и коэффициента сжатия $k=2$ (вариант 1, табл. 3). При использовании этих параметров разница между расчётными и наблюдаемыми значениями составляет до 1 балла. Уравнения (2) и (3) (варианты 2 и 3, табл. 3) дают занижение расчётной интенсивности I_i на расстояниях более 100 км. На расстояниях до 20–30 км эта разница незначительна – порядка 0.2–0.3 балла. При использовании коэффициента сжатия $k=3$ уравнения (1) и (2) (варианты 4 и 5, табл. 3) дают хорошую (менее 0.5 балла) сходимость на всех расстояниях. Наилучшая аппроксимация получена для уравнения (2) для Северного и Центрального Тянь-Шаня вдоль структур и коэффициента сжатия $k=3$.

Таблица 4. Варианты расчёта последствий землетрясения с использованием параметров очага американской сейсмологической службы

№	Уравнение макросейсмического поля	Коэффициент сжатия k	Ориентация поля
Вариант 1*	(1)	2	Вдоль разломов
Вариант 2*	(2)	—	—
Вариант 3*	(3)	—	—
Вариант 4*	(1)	3	—
Вариант 5*	(2)	—	—
Вариант 6*	(3)	—	—

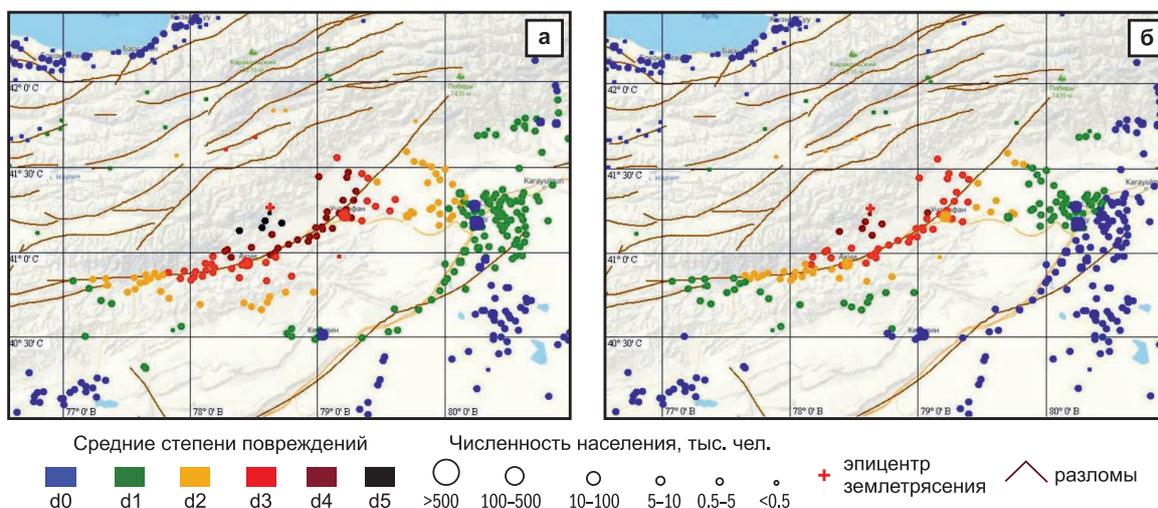


Рис. 4. Результаты моделирования последствий землетрясения 22 января 2024 г. в Китае: а – вариант 1, табл. 3; б – вариант 3, табл. 3

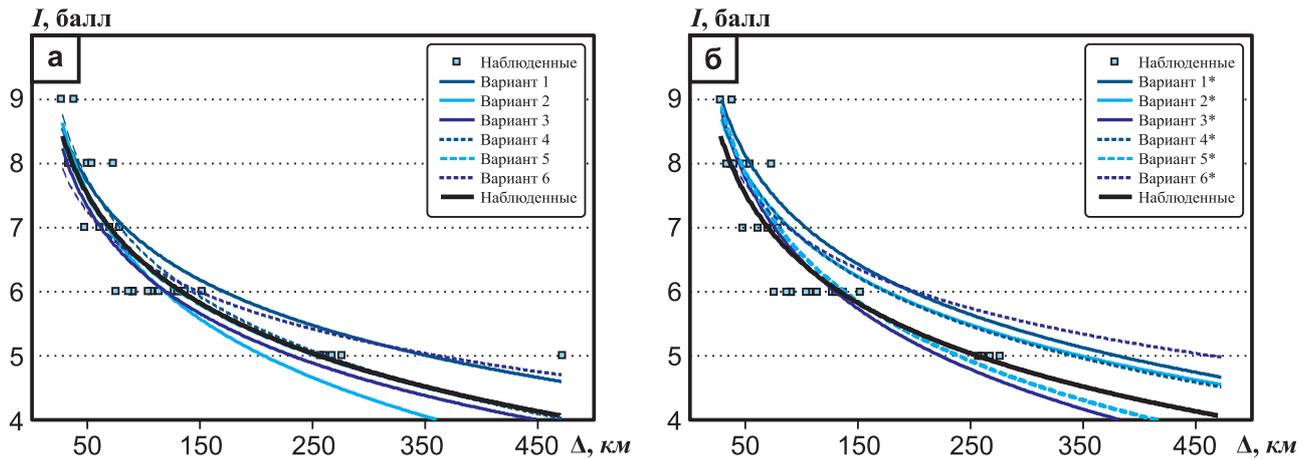


Рис. 5. Сравнение наблюдаемой и расчётных интенсивностей:
а – варианты 1–6 (табл. 3); б – варианты 1*–6* (табл. 4).

Сплошными линиями показаны варианты расчёта для коэффициента сжатия $k=2$, пунктирными – для $k=3$

На рис. 5б приведены результаты сравнения наблюдаемых значений интенсивности сотрясений I (точки и осредняющая кривая) и расчётных значений для вариантов 1*–6* (табл. 4) с использованием параметров очага, определённых USGS в оперативном режиме (<https://earthquake.usgs.gov>).

Анализ рис. 5б показывает, что расчётные значения интенсивности по вариантам 1*–6* (табл. 4) дают хорошую сходимость в эпицентральной зоне ($\Delta < 50$ км). При использовании уравнения (1) для коэффициентов сжатия $k=2$ и $k=3$ (варианты 1* и 4*, табл. 4) наблюдается систематическое завышение расчётной интенсивности I_i . Уравнение (2) даёт систематическое завышение при использовании коэффициента сжатия $k=2$ (вариант 3*, табл. 4). При использовании коэффициента сжатия $k=3$ уравнение (2) (вариант 5*, табл. 4) даёт небольшое (менее 0.5 балла) завышение на расстояниях до 150 км. С увеличением расстояния вариант 5* (табл. 4) занижает значения интенсивности на 0.8 балла. При использовании коэффициента сжатия $k=2$ система уравнений (3) (вариант 3*, табл. 4) даёт небольшое (0.3–0.5 балла) завышение на расстояниях до 150 км. С увеличением расстояния расчётные значения по варианту 3* (табл. 4) ниже наблюдаемых значений интенсивности на 1 балл. При использовании коэффициента сжатия $k=3$ система уравнений (3) (вариант 6*, табл. 4) даёт хорошую сходимость на расстояниях до 50 км. С увеличением расстояния расхождения увеличиваются до 1.0–1.5 балла. Наилучшая сходимость получена для системы уравнений (3) и коэффициента сжатия $k=2$,

и уравнения (2) и коэффициента сжатия $k=3$ (варианты 3* и 5*, табл. 4).

В табл. 5 приведены результаты сравнения расчётных интенсивностей с наблюдаемыми значениями.

Анализ данных табл. 5 показал, что при любых параметрах расчёта получаются заниженные значения для $I_i=9$ баллов. Для значений $I_i=8$ и $I_i=6$ баллов практически все параметры расчёта дают значения $\Delta I_i \leq 0.5$ балла. Для $I_i=7$ баллов использование параметров расчёта вариантов 1*–6* (табл. 4) даёт превышение более 0.5 балла, в то время как результаты расчёта для вариантов 2–3, 5–6 с параметрами очага, определёнными китайской службой (табл. 2) – $\Delta I_i \leq 0.5$ балла для этого значения I_i . Для значения $I_i=5$ баллов при любых параметрах расчёта наблюдается тенденция к занижению значений.

Совместный анализ графических и табличных данных позволил сделать вывод, что наилучшей сходимость обладает вариант 5 (табл. 3) со следующими параметрами макросейсмического поля: уравнение (2) для Северного и Центрального Тянь-Шаня вдоль структур, коэффициент сжатия $k=3$, ориентация вдоль основных геологических структур и параметры очага $M=7.1$ и $h=22$ км.

Оценка ожидаемых физических и экономических потерь от землетрясения 22 января 2024 года при моделировании последствий по варианту 5 (табл. 3)

На рис. 6 показаны результаты моделирования последствий Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. с помощью системы «Экстремум».

Таблица 5. Отклонение наблюдаемых и расчётных интенсивностей I для разных баллов для вариантов 1–6/1*–6* (табл. 2 и 3)

I , балл	Варианты					
	1/1*	2/2*	3/3*	4/4*	5/5*	6/6*
	$k=2$			$k=3$		
5	0.00/0.00	-1.00/0.00	-/-1.00	-0.80/0.00	-0.80/-0.80	-/-
6	0.57/1.07	0.28/0.64	0.28/0.43	0.57/0.64	0.43/0.43	0.35/0.57
7	0.75/1.00	0.00/1.00	0.00/0.75	0.75/1.00	0.25/1.00	0.00/0.75
8	0.00/0.17	-0.17/0.00	-0.67/0.00	0.00/0.00	-0.33/0.00	-0.50/0.00
9	-1.00/-0.50	-1.00/-0.50	-1.00/-1.00	-1.00/-0.50	-1.00/-0.50	-1.50/-1.00
$I_{\text{ср}}$	0.29/0.61	-0.13/0.39	-0.17/0.06	0.16/0.38	-0.03/0.16	-0.41/0.33

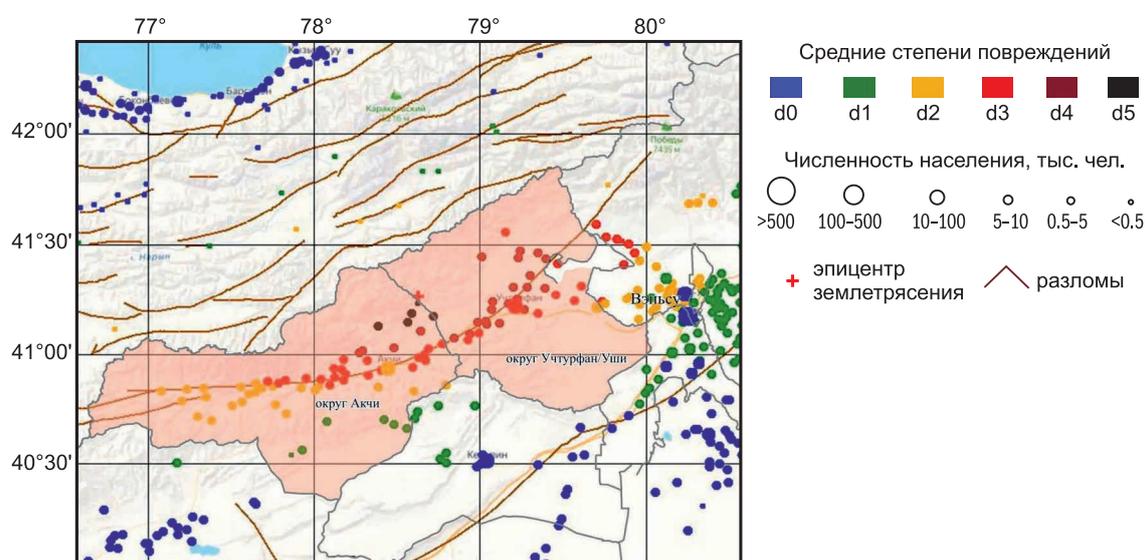


Рис. 6. Моделирование последствий Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. с Mw=7.0

На рис. 6 заливкой выделены области, соответствующие наиболее пострадавшим округам Акчи и Учтурфан (Уши).

По данным моделирования, в ближайших к эпицентру населённых пунктах Ямансу и Курансарик в округе Акчи средняя степень повреждения $d_{\text{ср}}=5$, что соответствует обвалам. Также в зоне, близкой к эпицентру, степени повреждений зданий оцениваются как $d_{\text{ср}}=3$ и $d_{\text{ср}}=4$. В округе Учтурфан (Уши) населённые пункты получили среднюю степень повреждений $d_{\text{ср}}=3$ и $d_{\text{ср}}=4$, что соответствует тяжёлым повреждениям и частичным обрушениям зданий.

В табл. 6 в численном виде приведены расчётные показатели физической уязвимости в некоторых пострадавших населённых пунктах КНР.

Экономическая уязвимость зданий, характеризующая ущерб в стоимостном выражении, для выбранных населённых пунктов приведена на

рис. 7. Экономическая уязвимость зданий определяется как отношение стоимости восстановления зданий после сейсмического воздействия интенсивностью I к первоначальной стоимости зданий.

Сравнение наблюдаемых и расчётных значений потерь проводилось по данным [Xīnjiāng wū shén ..., 2024; China allocates ..., 2024]. По данным [Xīnjiāng wū shén ..., 2024], в округе Акчи погибли три человека и ещё 9632 человека были перемещены (или остались без крова). В целом в пострадавших районах обрушилось по меньшей мере 210 домов и ещё 8079 получили повреждения. В Кыргызской автономной префектуре Кызылсу, где расположен уезд Акчи, обрушилось 93 здания, ещё 851 было повреждено. Ущерб и жертвы были минимальными, поскольку землетрясение произошло в малонаселённом районе.

Таблица 6. Показатели физической уязвимости в населённых пунктах

Населённый пункт	Δ , км	$d=1$	$d=2$	$d=3$	$d=4$	$d=5$	d_{cp}
Курансарик	27	0.05	0.17	0.28	0.29	0.20	4.1
Ямансу	37	0.00	0.04	0.14	0.27	0.54	4.8
Акчи	41	0.16	0.24	0.24	0.14	0.05	2.7
Учтурфан	91	0.11	0.17	0.24	0.24	0.18	3.7
Аксу	135	0.15	0.05	0.01	0.00	0.00	0.6

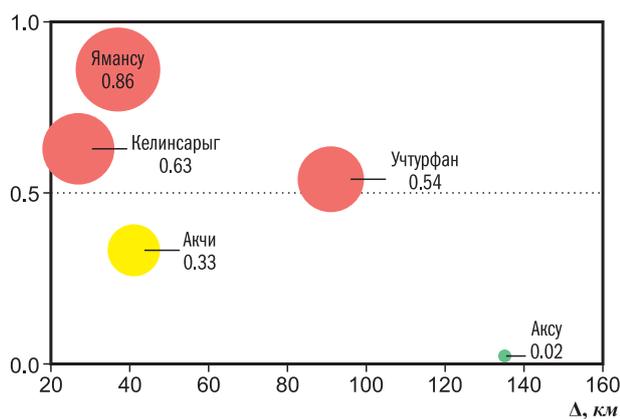


Рис. 7. Показатели расчётной экономической уязвимости зданий в пострадавших населённых пунктах

В округе Учтурфан (Уши), по данным властей, большинство разрушенных домов было расположено в сельской местности и построено её жителями, тогда как недавно построенное государственное жильё не разрушилось.

После землетрясения Китай выделил на ликвидацию последствий стихийных бедствий средства на общую сумму 30 млн юаней (4.23 млн долларов США).

Средства, выделенные Министерством финансов и Министерством по чрезвычайным ситуациям, будут использованы для поддержки ликвидации последствий стихийных бедствий и аварийно-спасательных работ с упором на поисково-спасательные работы, переселение пострадавших людей и ремонт повреждённых домов [China allocates ..., 2024].

Сравнение расчётных оценок ущерба для населённых пунктов, расположенных в сильно пострадавшей провинции Акчи, с наблюдаемым эффектом по данным [China allocates ..., 2024; Xīnjiāng wū shén ..., 2024] показывает удовлетворительную сходимость в оценках расчётных и наблюдаемых средних степеней повреждений застройки населённых пунктов.

Обсуждение результатов

В настоящей работе показано значение процедуры калибровки региональных моделей макросейсмического поля системы «Экстремум» для повышения надёжности оперативных оценок потерь от землетрясений.

В процессе калибровки модели макросейсмического поля системы «Экстремум» для приграничной территории Китая–Кыргызстана выполнен анализ применимости уравнений затухания сейсмической интенсивности, полученных исследователями в разные годы для зоны Центрального и Северного Тянь-Шаня [Джанузакоев, 2013] и западной части материкового Китая [Xu et al., 2021].

В настоящей статье расчётные значения интенсивности I_1 сравнивались с наблюдаемыми значениями интенсивности для населённых пунктов в соответствии с информацией, синтезированной из разных источников.

Следует отметить трудности получения оперативной информации о землетрясениях, которые включают:

- *ограниченность данных.* Информация, доступная на сайтах, таких, как DYFI Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov/data/dyfi/>), может не предоставлять полную картину распределения интенсивности землетрясения. Это связано с тем, что данные могут быть ограничены или недоступны в реальном времени;

- *отсутствие прямых наблюдений.* В некоторых случаях, особенно в отдалённых или труднодоступных районах, прямые наблюдения могут быть невозможны. Это затрудняет получение точной информации;

- *время сбора данных.* Сбор данных после землетрясения может занять время, особенно если доступ к месту события ограничен или требует значительных усилий. Это также может привести к задержкам в получении актуальной информации;

– *человеческий фактор*. Ошибки в сборе, обработке и интерпретации данных могут влиять на точность полученной информации.

Для преодоления этих трудностей авторы использовали различные источники информации, включая макросейсмические данные и инструментальные измерения.

На рис. 8 представлено сравнение наблюдаемых значений интенсивности в населённых пунктах по синтезированным данным из разных источников (табл. 2) и по данным DYFI USGS (<https://earthquake.usgs.gov/data/dyfi/>).

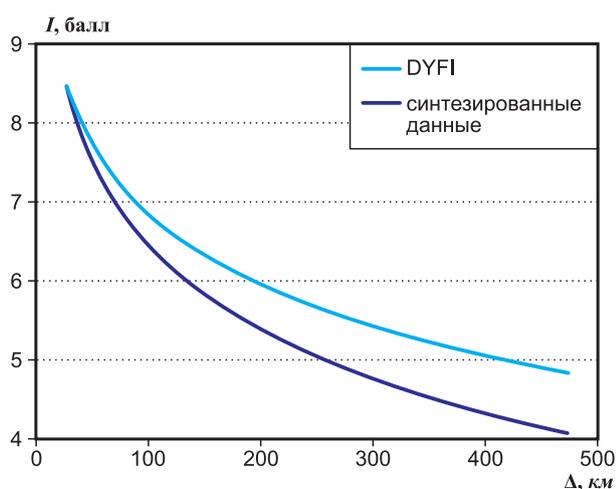


Рис. 8. Сравнение наблюдаемых значений интенсивности в населённых пунктах по синтезированным данным из разных источников и данным об интенсивности, основанных на интернет-материалах по DYFI USGS (<https://earthquake.usgs.gov/data/dyfi/>)

Информация на сайте DYFI (<https://earthquake.usgs.gov/data/dyfi/>) даёт завышенные оценки наблюдаемой интенсивности по сравнению с синтезированными данными из разных источников. Разница достигает 0.7–0.8 баллов (рис. 8). Это может быть связано с тем, что на сайте DYFI приведены данные об ощущениях для населённых пунктов на территории Казахстана, Кыргызстана и Российской Федерации, а информация о территории Китая практически отсутствует.

Несмотря на то, что полученные оценки расчётных интенсивностей носят предварительный характер, использование уравнения затухания сейсмической интенсивности для Центрального и Северного Тянь-Шаня позволяет получить расчётные средние степени повреждения d_{cp} застройки для наиболее сильно пострадавших населённых пунктов, близкие к наблюдаемым.

Заключение

В настоящей работе показано большое значение процедуры калибровки региональных моделей макросейсмического поля системы «Экстремум» для повышения надёжности оперативных оценок потерь от землетрясений.

Результаты моделирования последствий Учтурфанского землетрясения 22 января показали хорошую сходимость расчётных и наблюдаемых значений интенсивности I при использовании следующих параметров макросейсмического поля: уравнение для Северного и Центрального Тянь-Шаня вдоль структур, коэффициент сжатия $k=3$ и параметры очага $M=7.1$ и $h=22$ км.

Сравнение полученных оценок ущерба для населённых пунктов Ямансу и Курансарик, расположенных в сильно пострадавшей провинции Акчи, с наблюдаемым эффектом показывает удовлетворительную сходимость в оценках расчётных и наблюдаемых средних степеней повреждений застройки населённых пунктов.

Для успешного проведения работ по калибровке моделей макросейсмического поля системы «Экстремум» и других глобальных систем, используемых для оперативной оценки последствий землетрясений, необходимо создание и своевременное пополнение базы знаний о макросейсмических и инженерно-сейсмологических последствиях землетрясений. В этой связи представляется важным международное сотрудничество в области обработки «больших данных» (Big Data) и создание распределённой базы знаний о физических и социально-экономических последствиях прошлых сильных землетрясений в рамках проектов ООН / КОДАТА с указанием границ калибровочных зон.

Авторы выражают благодарность своим коллегам за постоянную поддержку, обсуждение методических вопросов по калибровке моделей для оценки последствий землетрясений в оперативном режиме. Особая благодарность сотрудникам ООО «ЦИЭКС» за плодотворное сотрудничество и вклад в развитие среды системы «Экстремум».

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки 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

- Гребенникова В.В. Модели сводных изосейст исторических и современных землетрясений с интенсивностью сейсмических сотрясений от 6 до 10–11 баллов // Вестник Института сейсмологии НАН РК. – 2015. – № 1 (5). – С. 13–25. – EDN: TKATRG
- Джанузаков К.Д. Региональные особенности затухания интенсивности сотрясений сильных землетрясений Кыргызстана и прилегающих к нему районов // Вестник Института сейсмологии НАН РК. – 2013. – № 2 (2). – С. 13–18.
- Крестников В.Н., Белоусов Т.П., Ермилин В.И. и др. Четвертичная тектоника Памира и Тянь-Шаня. – М.: Наука, 1979. – 115 с.
- 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. – 2017. – № 2. – С. 11–26. – EDN: YFYKVP
- Мамыров Э. Достижения и проблемы прогноза сильных землетрясений на территории Кыргызстана // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2014. – № 4 (2). – С. 62–79. – EDN: YRSZAP
- Мамыров Э., Маханькова В.А., Эрнесова Н. Главные периоды изменения сейсмического режима Тянь-Шаня в XX веке и в начале XXI века // Наука и новые технологии. – 2011. – № 1. – С. 42–54. – EDN: YNQSZF
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
- Мирзоев К.М., Джураев Р.У. Основные закономерности затухания балльности землетрясений на территории Таджикистана // Землетрясения Средней Азии и Казахстана. 1983. МСССС при Президиуме АН СССР. Региональный центр прогноза землетрясений Средней Азии и Казахстана. – Душанбе: Дониш, 1985. – С. 99–128.
- Пржиялговский Е.С., Рыбин А.К., Морозов Ю.А., Лаврушина Е.В., Леонов М.Г., Баталева Е.А. Геолого-геофизический трансект Среднего Тянь-Шаня через Нарынскую и Атбашинскую впадины // Геодинамика и Тектонофизика. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 1–20. – DOI: 10.5800/GT-2022-13-1-0568. – EDN: BWRWFM
- Соколова И.Н., Габсатарова И.П., Берёзина А.В., Аристова И.Л. Сильное землетрясение 22 января 2024 г. с $M_w=7.0$ на юге Тянь-Шаня // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 1. – С. 42–64. – DOI: 10.35540/2686-7907.2024.1.03. – EDN: KHSGBI
- Трифонов В.Г., Караханян А.С., Кожурин А.И. Активные разломы и сейсмичность // Природа. – 1989. – № 12. – С. 32–38.
- Фролова Н.И., Габсатарова И.П. Использование макросейсмических данных для повышения надёжности оперативных оценок потерь на примере Курчалойского землетрясения // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире: Материалы 9-й Международной научно-практической конференции (ГЕОРИСК-2015): в 2-х т. Т. 2 / Отв. ред. В.И. Осипов. – М.: РУДН, 2015. – С. 391–399. – EDN: UWGXIF
- Фролова Н.И., Габсатарова И.П. Изучение параметров закона затухания макросейсмической интенсивности Тувинских землетрясений 2011 и 2012 гг. (Республика Тува) // Землетрясения Северной Евразии. – 2018. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018а. – С. 318–323. – EDN: YNTULA
- Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н. Использование макросейсмических данных для повышения надёжности оперативных оценок потерь на примере землетрясений РФ и сопредельных территорий // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учётом глобального изменения климата «ГЕОРИСК-2018»: Материалы X Международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков: в 2-х т. Т. 1 / Отв. ред. Н.Г. Мавлянова. – М.: РУДН, 2018б. – С. 218–226. – EDN: YPKOHZ
- Фролова Н.И., Угаров А.Н. База знаний о сильных землетрясениях как инструмент повышения надёжности оперативных оценок потерь // Геоэкология. – 2018в. – № 6. – С. 3–20. – DOI: 10.1134/S0869780318060017. – EDN: YMFUYP
- Шебалин Н.В., Ершов И.А., Шестоперов Г.С., Гехман А.С. Улучшенный вариант шкалы сейсмической интенсивности (MMSK-86) на базе шкал MSK-64 и МСССС-73 (заключительный отчет). М.: МСССС, ИФЗ. 1986. 61 с.
- Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция / Отв. ред. Г.А. Соболев. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. – 359 с. – EDN: WXGFTJ
- Bondar I., Mackey K., Berezina A., Mikhailova N., Kashima T., Gok R., Chiang A. Relocation of the Central Asia comprehensive seismic bulletin // Book of abstracts CTBT: Science and Technology Conference 2023. – Vienna, Austria: Hofburg Palace & Online, 2023. – P. 97–98. – URL: <https://conferences.ctbto.org/event/23/book-of-abstracts.pdf>
- Xia C., Nie G., Li H., Fan X., Qi W. A composite database of casualty-inducing earthquakes in mainland China // Natural Hazards. – 2023. – V. 116. – P. 3321–3351. – DOI: 10.1007/s11069-022-05811-z
- China allocates 30 mln yuan for Xinjiang earthquake relief // XINHUANET [Site]. – URL: <https://english.news.cn/20240123/944502c6830f4406b4114a659caec8bf/c.html> (дата обращения 10.04.2024).
- China Earthquake Administration [Site]. – URL: <https://www.cea.gov.cn/cea/index/index.html> (дата обращения 26.01.2024).
- China Earthquake Administration releases Xinjiang Wushi 2 earthquake intensity map with a magnitude of 7.1, with the highest intensity being 9 degrees [Site]. – URL: http://news.china.com.cn/2024-01/26/content_116967450.shtml (дата обращения 26.01.2024).
- Chinese seismic intensity scale (GB/T 17742-2020) [Site]. – URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT17742-2020> (дата обращения 24.01.2024).

- Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform regional seismicity // *Journal of Geophysical Research*. – 1981. – V. 86. – P. 2825–2852. – DOI: 10.1029/JB086iB04p02825
- Ekstr m G., Nettles M., Dziewonski A.M.* The Global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2012. – V. 200–201. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Frolova N.I., Larionov V.I., Bonnin J., Sushchev S.P., Ugarov A.N., Kozlov M.A.* Loss caused by earthquakes: rapid estimates // *Natural Hazards*. – 2017. – V. 88, Is. 1. – P. 63–80. – DOI: 10.1007/s11069-016-2653-x
- Global CMT Catalog Search* // *Global CMT Web Page* [Site]. – URL: <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (дата обращения 10.04.2024).
- Shebalin N.V., Ershov I.A., Shestoporov G.S., Gekhman A.S.* An improved version of the seismic intensity scale (MMSK-86) based on the MSK-64 and MSSSS-73 scales (final report). Moscow: MSSSS, IFZ. 1986. 61 P.
- Shao Z.G., Wu Y.Q., Ji L.Y., Diao F.Q., Shi F.Q., Li Y.J., Long F., Zhang H. et al.* Determination of key seismic risk areas in Chinese mainland from 2021 to 2030. Beijing. – China Earthquake Administration: Institute of Earthquake Prediction, 2020.
- Shao Z.G., Wu Y.Q., Ji L.Y., Diao F.Q., Shi F.Q., Li Y.J., Long F., Zhang H. et al.* Assessment of strong earthquake risk in the Chinese mainland from 2021 to 2030 // *Earthquake Research Advances*. – 2022. – V. 3, Is. 1. – A. 100177. – DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100177
- Li S.Q.* Improved seismic intensity measures and regional structural risk estimation models // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2024. – V. 176. – A. 108256. – DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108256
- Xu W., Wu J., Gao M.* Seismic hazard analysis of China's mainland based on a new seismicity model // *International Journal of Disaster Risk Science*. – 2023. – V. 14. – P. 280–297. – DOI: 10.1007/s13753-023-00487-w
- Xīnjiāng wū shén 7.1 Jí dìzhèn zhèn qū: Qúnzhòng shēnghuó píngwěn yǒu xù zāiqíng páichá wēnbù tuījìn* 新疆乌什7.1级地震震区: 群众生活平稳有序 灾情排查稳步推进 [Site]. – URL: https://politics.gmw.cn/2024-01/26/content_37113751.htm (In Chinese). (Дата обращения 10.04.2024).
- Xu W., Weisong Ya., Dehu Yu.* A real-time prediction model for macroseismic intensity in China // *Journal of Seismology*. – 2021. – V. 25. – P. 235–253. – DOI: 10.1007/s10950-020-09965-w
- Zhou B.G., Chen G.X., Gao Z.W.* The technical highlights in identifying the potential seismic sources for the update of national seismic zoning map of China // *Technology for Earthquake Disaster Prevention*. – 2013. – V. 8, N 2. – P. 113–124. (In Chinese).

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 ГО ЧС (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

Simulation of January 22, 2024 Mw=7.0 Uqturpan earthquake consequences with the “Extremum” system application

© 2024 N.I. Frolova¹, N.S. Malaeva^{1,2}, S.P. Suchshev³

¹IEG RAS, Moscow, Russia; ²VNII GOChS (FC), Moscow, Russia; ³BMSTU, Moscow, Russia

Received July 26, 2024

Abstract This paper reports the use of intensity attenuation equations for the territory of the Northern Tien Shan by modeling the impact of a powerful destructive earthquake of January 22, 2024 in China. The relevance of the study follows from the needed reliable estimates of possible losses due to earthquakes in order to aid the decision making process for the response and the proper choice of a search and rescue strategy for the heavily affected settlements. The paper has as its goal the calibration of the Extremum system models for the territory of the Northern Tien Shan. Our study is the first to analyze the seismic intensity attenuation equations obtained by researchers at different times with a view to their applicability to near real time loss assessment for strong events occurring in the area of study. We investigate how the results of seismic attenuation modeling are affected by the ellipse compression factor k and the source parameters of a strong event as determined by different seismological agencies in the alert mode. Computer simulation was applied to assess the possible impact of the January 22, 2024 earthquake using the “Extremum” system developed with our participation. This paper provides results of modeling the impact of the 2024 Uqturpan earthquake, as well as an assessment of the convergence achieved by calculated and observed intensities for various intensity prediction equations obtained before for China, Kyrgyzstan and adjacent areas within the Gissar-Kokshaalsky seismically active belt.

Keywords Loss due to earthquakes, near real time estimations, the “Extremum” system, macroseismic field model calibration, Uqturpan earthquake.

For citation Frolova, N.I., Malaeva, N.S., & Suchshev, S.P. (2024). [Simulation of January 22, 2024 Mw=7.0 Uqturpan earthquake consequences with “Extremum” system application]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(3), 60-76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.3.04>. EDN: TLSPQJ

References

- Bondar, I., Mackey, K., Berezina, A., Mikhailova, N., Kashima, T., Gok, R., & Chiang, A. (2023). Relocation of the Central Asia comprehensive seismic bulletin. In *Book of abstracts CTBT: Science and Technology Conference 2023* (pp. 97-98). Vienna, Austria: Hofburg Palace & Online. Retrieved from <https://conferences.ctbto.org/event/23/book-of-abstracts.pdf>
- China allocates 30 mln yuan for Xinjiang earthquake relief. (2024). *XINHUANET*. Retrieved from <https://english.news.cn/20240123/944502c6830f4406b4114a659caec8bf/c.html> (Accessed 10.04.2024).
- China Earthquake Administration releases Xinjiang Wushi 2 earthquake intensity map with a magnitude of 7.1, with the highest intensity being 9 degrees. (2024). Retrieved from http://news.china.com.cn/2024-01/26/content_116967450.shtml (Accessed 26.01.2024).
- China Earthquake Administration. (2024). Retrieved from <https://www.cea.gov.cn/cea/index/index.html> (Accessed 26.01.2024).
- Chinese seismic intensity scale (GB/T 17742-2020). (2024). Retrieved from <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT17742-2020> (Accessed 24.01.2024).
- Dzhanuzakov, K.D. (2013). [Regional attenuation features due to the intensity of strong earthquakes and adjacent areas]. *Vestnik Instituta seismologii NAN RK* [Bulletin of Seismology Institute of Republic Kyrgyzstan NAS], 2(2), 13-18. (In Russ.).
- Dziewonski, A.M., Chou, T.-A., & Woodhouse, J.H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform regional seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86, 2825-2852. DOI: 10.1029/JB086iB04p02825
- Ekström, G., Nettles, M., & Dziewonski, A.M. (2012). The Global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200–201, 1-9. DOI: 10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Frolova, N.I., & Gabsatarova, I.P. (2018a). [Attenuation macroseismic intensity law parameters studying

- on the 2011 and 2012 Tuvan earthquakes (Republic of Tuva)]. *Zemletryaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes of the Northern Eurasia], 21(2012), 318-323. (In Russ.). EDN: YNTULA
- Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., & Ugarov, A.N. (2018b). [Using the macroseismic data to increase the reliability of operational estimates losses on the example of earthquakes in the Russian Federation and adjacent territories]. In *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnymi riskami s uchetom global'nogo izmeneniia klimata "GEORISK-2018": Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po problemam snizheniia prirodnikh opasnostei i riskov: v 2-kh t. T. 1 / Otv. red. N.G. Mavlianova* [Analysis, forecast and management of natural risks in the modern world: Materials of the X International Scientific and Practical Conference on the problem of reducing natural risks and risks: in 2 vols. Vol. 1. Ed. N.G. Mavlianova] (pp. 218-226). Moscow, Russia: RUDN Publ. (In Russ.). EDN: YPKOHZ
- Frolova, N.I., & Ugarov, A.N. (2018c). [Knowledge base of strong earthquakes as a tool to improve the reliability of operational estimates losses]. *Geoekologiya* [Geoecology], 6, 3-20. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0869780318060017. EDN: YMFUYP
- Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P. (2015). [Using the macroseismic data to increase the reliability of operational estimates losses on the example of the Kurchaloyevsky earthquake]. In *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnymi riskami v sovremennom mire: Materialy 9-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (GEORISK-2015): v 2-kh t. T. 2 / Otv. red. V.I. Osipov* [Analysis, forecast and management of natural risks in the modern world: Materials of the 9th International Scientific and Practical Conference (GEORISK-2015): in 2 vols. Vol. 2. Ed. V.I. Osipov] (pp. 391-399). Moscow, Russia: RUDN Publ. (In Russ.). EDN: UWGXIF
- Frolova, N.I., Larionov, V.I., Bonnin, J., Sushchev, S.P., Ugarov, A.N., & Kozlov, M.A. (2017). Loss caused by earthquakes: rapid estimates. *Natural Hazards*, 88(1), 63-80. DOI: 10.1007/s11069-016-2653-x
- Global CMT Catalog Search*. (2024). Global CMT Web Page. Retrieved from <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (Accessed 10.04.2024).
- Grebennikova, V.V. (2015). [Historical and modern earthquakes composite isoseists models with seismic shaking intensity from 6 to 10-11]. *Vestnik Instituta seismologii NAN RK* [Bulletin of Seismology Institute of Republic Kyrgyzstan NAS], 1(5), 13-25. (In Russ.). EDN: TKATRG
- Krestnikov, V.N., Belousov, T.P., Ermilin, V.I. et al. (1979). *Chevertichnaia tektonika Pamira i Tian'-Shania* [Quaternary tectonics of the Pamirs and Tien Shan]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 115 p. (In Russ.).
- 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* [Geoecology], 2, 11-26. (In Russ.). EDN: YFYKVP
- Li, S.Q. (2024). Improved seismic intensity measures and regional structural risk estimation models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176, 108256. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108256
- Mamyrov, E. (2014). [Forecasting strong earthquakes achievements and problems in Kyrgyzstan]. *Vestnik Instituta seismologii NAN RK* [Bulletin of Seismology Institute of Republic Kyrgyzstan NAS], 4(2), 62-79. (In Russ.). EDN: YRSZAP
- Mamyrov, E., Makhan'kova V.A., & Ernesova, N. (2011). [The main periods of changes in the seismic regime of the Tien Shan in the XX century and at the beginning of the XXI century]. *Nauka i novye tekhnologii* [Science and New Technologies], 1, 42-54. (In Russ.). EDN: YNQSZF
- Medvedev, S.V., Sponheuer, W., & Karnik, V. (1965). *Shkala seismicheskoi intensivnosti MSK-64* [Seismic Intensity Scale MSK-64]. Moscow, Russia: Interdepartmental Geophysical Commission of the USSR Acad. Sci. Publ., 11 p. (In Russ.).
- Mirzoev, K.M., & Dzhuraev, R.U. (1985). [Attenuation of the magnitude main patterns on the Tajikistan earthquakes]. In *Zemletriaseniia Srednei Azii i Kazakhstana. 1983. MSSSS pri Prezidiume AN SSSR. Regional'nyi Tsentri prognoza zemletriasenii Srednei Azii i Kazakhstana* [Central Asia and Kazakhstan earthquakes. 1983. MSSSS under the USSR Council Ministers. Central Asia and Kazakhstan regional Earthquake Prediction Center] (pp. 99-128). Dushanbe, Tajikistan: Donish Publ. (In Russ.).
- Przhiialgovskii, E.S., Rybin, A.K., Morozov Yu.A., Lavrushina, E.V., Leonov, M.G., & Bataleva, E.A. (2022). [Geological and geophysical Transect of the Middle Tien Shan through the Naryn and Atbashinsky depressions]. *Geodinamika i Tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics], 13(1), 1-20. (In Russ.). DOI: 10.5800/GT-2022-13-1-0568. EDN: BWRWFM
- Shao, Z.G., Wu, Y.Q., Ji, L.Y., Diao, F.Q., Shi, F.Q., Li, Y.J., Long, F., Zhang, H. et al. (2020). *Determination of key seismic risk areas in Chinese mainland from 2021 to 2030. Beijing*. China Earthquake Administration: Institute of Earthquake Prediction.
- Shao, Z.G., Wu, Y.Q., Ji, L.Y., Diao, F.Q., Shi, F.Q., Li, Y.J., Long, F., Zhang, H. et al. (2022). Assessment of strong earthquake risk in the Chinese mainland from 2021 to 2030. *Earthquake Research Advances*, 3(1), 100177. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100177
- Sherman, S.I. (2014). *Seismicheskii protsess i prognoz zemletriasenii: tektonofizicheskaia kontseptsiiia* [Seismic process and earthquake prediction: tectonophysical concept]. Novosibirsk, Russia: Academic Publ. House "Geo", 359 p. (In Russ.). EDN: WXGFTJ

- Sokolova, I.N., Gabsatarova, I.P., Beryozina, A.V., & Aristova, I.L. (2024). [Large earthquake on January 22, 2024 with Mw=7.0 in the south of Tien Shan]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(1), 42-64. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2024.1.03. EDN: KHSGBI
- Trifonov, V.G., Karakhanian, A.S., & Kozhurin, A.I. (1989). [Active faults and seismicity]. *Priroda* [Nature], 12, 32-38. (In Russ.).
- Xia C., Nie G., Li H., Fan X., & Qi W. (2023). A composite database of casualty-inducing earthquakes in mainland China. *Natural Hazards*, 116, 3321-3351. DOI: 10.1007/s11069-022-05811-z
- Xīnjiāng wū shén 7.1 jí dìzhèn zhèn qū: Qúnzhòng shēnghuó píngwěn yǒu xù zāiqíng páichá wēnbù tuījìn*
新疆乌什7.1级地震震区：群众生活平稳有序 灾情
排查稳步推进. (2024). Retrieved from https://politics.gmw.cn/2024-01/26/content_37113751.htm (In Chinese). (Accessed 10.04.2024).
- Xu, W., Weisong, Ya., & Dehu, Yu. (2021). A real-time prediction model for macroseismic intensity in China. *Journal of Seismology*, 25, 235-253. DOI: 10.1007/s10950-020-09965-w
- Xu, W., Wu, J., & Gao, M. (2023). Seismic hazard analysis of China's mainland based on a new seismicity model. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14, 280-297. DOI: 10.1007/s13753-023-00487-w
- Zhou, B.G., Chen, G.X., & Gao, Z.W. (2013). The technical highlights in identifying the potential seismic sources for the update of national seismic zoning map of China. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 8(2), 113-124. (In Chinese).

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