

УДК 550.34.

Актуализация показателей сейсмического риска на примере Иркутской области и Республики Бурятия

© 2023 г. Н.И. Фролова¹, С.П. Суцев², А.Н. Угаров², Н.С. Малаева¹

¹ИГЭ РАН, г. Москва, Россия; ²МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 30.10.2022 г.

Аннотация. Для всех сейсмоопасных стран, включая Российскую Федерацию, производится периодическая актуализация оценок сейсмического риска. Потребность в актуализации возрастает в связи с изменением оценок уровня опасности и свойств уязвимости элементов риска. Для сейсмоопасных регионов Российской Федерации, отнесённых к зонам опережающего развития, актуализация показателей риска призвана обеспечить повышение эффективности, планируемых превентивных мероприятий для снижения уровня риска. Расчёты показывают, что разработка карт риска, а также последующее планирование и выполнение превентивных мер, привязанных к месту, выделенному на карте как наиболее опасное, позволяют уменьшить возможные социальные и экономические потери на 20–30%. Рассматриваются вопросы актуализации показателей сейсмического риска на примере Иркутской области и Республики Бурятия. Для указанных регионов, включённых в программу опережающего развития, использованы актуальные значения сейсмической опасности и уязвимости застройки. Приводится описание процедуры оценки и картирования показателей риска с помощью географической информационной системы «Экстремум». Представлены примеры тематических карт, иллюстрирующих весьма высокие оценки индивидуального риска для 6% территории Иркутской области и 39% территории Республики Бурятия. Полученные результаты исследования свидетельствуют о необходимости и важности обеспечения сейсмобезопасности населения в рамках планирования мероприятий опережающего развития территорий.

Ключевые слова: актуализация оценок риска, социальные и экономические показатели сейсмического риска, имитационное моделирование, Иркутская область, Республика Бурятия, географическая информационная система «Экстремум».

Для цитирования: Фролова Н.И., Суцев С.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Актуализация показателей сейсмического риска на примере Иркутской области и Республики Бурятия // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 1. – С. 26–50. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.1.02>. – EDN: QYVJPZ

Введение

Анализ чрезвычайных ситуаций (ЧС) свидетельствует о том, что стихийные бедствия, связанные с землетрясениями для отдельных территорий опережающего роста Российской Федерации (РФ), представляют растущую угрозу безопасности граждан и экономики. Несмотря на принимаемые меры, ущерб от сильных землетрясений растёт. Прогнозирование возможного ущерба в будущем свидетельствует о том, что в настоящее время актуальны любые упреждающие действия, направленные на снижение сейсмического риска.

В связи с развитием новых технологий возникает возможность повышения надёжности оце-

нок риска за счёт совершенствования средств и методов компьютерного моделирования. Следует отметить, что компьютерное моделирование, применяемое для минимизации негативных последствий землетрясений, широко используется во многих сейсмоопасных странах мира. В любом случае, поскольку землетрясение предотвратить не представляется возможным, разрабатываются мероприятия защиты, снижающие разрушительный эффект события. Как и для других сейсмоопасных стран, при планировании опережающего роста сейсмоопасных районов РФ, важны обоснованные превентивные мероприятия, направленные на снижение возможного ущерба и его вероятности. Компьютерная модель позволяет сравнивать различные

наборы превентивных мероприятий, оценивая их эффективность за короткий промежуток времени.

Расчёты показывают, что разработка карт риска для каждого конкурентного набора превентивных мероприятий позволяет уменьшить ожидаемые социальные и экономические потери от сильных землетрясений на 20–30%.

Первым шагом на пути к оптимизации превентивных мер является актуализация имеющихся оценок показателей сейсмического риска. В данной статье представлены результаты такой оценки, которая выполнена для Иркутской области и Республики Бурятия.

Подобная актуализация оценки риска в случае сильных землетрясений производится в большинстве сейсмоопасных стран мира. Оценки выполняются с различной детальностью, обусловленной способом представления в моделях данных о сейсмической опасности и уязвимости элементов риска. Результаты оценки риска отображаются на тематических картах. Примером обзорной карты сейсмического риска мира является результат оценки риска, полученный в 2015 г. с использованием материалов проектов Global Natural Disaster Hotspots [Dilley et al., 2005] и Global Risk and Vulnerability Index Trends per Year (GRAVITY) [Peduzzi et al., 2009]. Карта была опубликована в Атласе риска природных катастроф мира [Li et al., 2015]. В качестве источника информации об уровне сейсмической опасности использовались оценки, полученные ранее в рамках проекта GSHAP [Giardini et al., 1999]. Для более детальных (региональных) оценок и карт сейсмического риска используются национальные базы данных и программное обеспечение, разрабатываемое совместными усилиями в рамках международных проектов [Zuccaro, 2004; Ranguelov, 2006; Tyagunov et al., 2006; Crowley et al., 2009; Jaiswal et al., 2009; Xu et al., 2011; Zhongchun et al., 2011; Pittore, 2015; Zanini et al., 2017; 2019; Meroni et al., 2017; Xin et al., 2019; Aguilar-Melendez et al., 2019; Gomez-Zapata et al., 2021; da Porta et al., 2021; Dolce et al., 2021; Zhang et al., 2022; Wu, Zhang, 2022]. Большое внимание в приведённых публикациях, посвящённых актуализации сейсмического риска, уделяется совершенствованию методов моделирования землетрясений и калибровки моделей, формируемых с использованием баз данных с информацией о наблюдаемых последствиях сильных землетрясений. В результате калибровки удаётся получить параметры, отражающие региональные особенности моделей сейсмической опасности, уязвимости зданий и сооружений, а также населения.

Совместные международные усилия сейсмологов и специалистов по сейсмостойкому строительству в рамках таких европейских рамочных проектов, как NERA FP7 и проекта SERA European Horizon 2020 направлены на создание динамического продукта для оценки сейсмического риска на территории Европейских стран. Предусмотрено обновление продукта по мере появления новых исходных данных об опасности и уязвимости элементов риска, а также разработке и калибровке новых моделей [So, Spence, 2013]. На основе результатов многолетних европейских проектов в области сейсмической опасности и риска в 2019 г. в ЕС создан специальный консорциум EFHR, чтобы обеспечить независимую от отдельных проектов основу для координации и сотрудничества в области сейсмической опасности и риска в регионе [Haslinger et al., 2022]. На сайте этой организации размещены как данные об элементах риска для европейских стран (<https://eu-risk.eucentre.it/exposure/>) и их уязвимости (<https://eu-risk.eucentre.it/physical-vulnerability/>), так и наборы карт показателей сейсмического риска разной детальности (<https://maps.eu-risk.eucentre.it>). Предполагается регулярное обновление исходных данных и моделей, а также их последующее использование для актуализации глобальных карт опасности и риска в рамках инициативы GEM (Global Earthquake Model).

В России для её территории первая карта индивидуального сейсмического риска построена в 2001 г. в соответствии с «Методикой прогнозирования последствий землетрясений» [Методика ..., 2000] с использованием геоинформационной системы (ГИС) «Экстремум». В 2005 г. карта была впервые опубликована в «Атласе природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации» [Анисимова и др., 2005]. В 2010 г. построен набор карт сейсмического риска в социальных и экономических показателях для населения Российской Федерации [Осинов и др., 2011; 2013]: карты индивидуального сейсмического риска R_{s1} – смертельный исход в случае сильного землетрясения; R_{s2} – смертельный исход и травмы различной тяжести в случае сильного землетрясения; R_{s3} – смертельный исход, травмы различной тяжести и понёшенные материальные убытки в случае сильного землетрясения. Несмотря на предварительный характер оценок, эти показатели позволяют выявить административные районы с высоким уровнем риска и принять решения о более детальном изучении возможности его снижения. Для уточнения оценок риска, полученных

для страны в целом, строятся карты сейсмического риска для административных районов и городов [Ларионов и др., 2003; 2012; 2020а; 2020б; Суцев и др., 2010; Frolova, 2010; Frolova et al., 2014; 2015; Осунов и др., 2015; Zaalishvili et al., 2019; Фролова и др., 2022б; 2022в]. Калибровка моделей ГИС «Экстремум» осуществляется с использованием региональных данных, а оценка последствий привязана к сценарным событиям, принадлежащим ближайшим зонам ВОЗ [Березинский и др., 2002; Фролова и др., 2018; 2019; 2020; 2021а; 2021б; 2022а; 2022в].

Предметом исследования, представленного в данной публикации, является актуализация оценки сейсмического риска в Иркутской области и Республике Бурятия, расположенных в Байкальской рифтовой зоне. Высокий сейсмический потенциал зоны подтверждается макросейсмическими сведениями о произошедших сильных землетрясениях, данными о палеосейсмодислокациях, полученными геологическими методами, и информацией о зарегистрированных землетрясениях широкого энергетического диапазона. За последние 250 лет в регионе произошло более 200 сильных и ощутимых землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ и интенсивностью в эпицентре 7–8 баллов [Березинский, 2001]. Сильное землетрясение 27.08.2008 г. с $M=6.2$ показало высокую уязвимость существующей застройки. Однако значительный ущерб ожидается с учётом того, что в районе возможны сильные события с магнитудой $M \geq 7$ [Березинский и др., 2009; 2010; Мельникова и др., 2009; 2014; Ружич и др., 2019; Radziminovich N. et al., 2013; Березинский и др., 2021] и $M=8$ согласно карте зон ВОЗ, подготовленной в рамках работ по ОСР-2016 [Уломов и др., 2016].

В настоящее время регион характеризуется повышенным уровнем сейсмичности. В период с сентября 2020 г. по январь 2021 г. в регионе произошли три сильные землетрясения: 21.09.2020 г. Быстринское с $M_w=5.5$; 09.12.2020 г. Кударинское с $M_w=5.5$; 11.01.2021 г. Хубсугульское с $M_w=6.7$ [Радзиминович и др., 2021; Гилёва и др., 2020; 2021; Radziminovich Y. et al., 2022].

Целью исследования, результаты которого представлены в данной публикации, является получение актуальной оценки сейсмического риска для территории Иркутской области и Республики Бурятия, учитывающей последние данные об изменении оценок сейсмической опасности и уязвимости застройки в пределах региона.

Полученные результаты являются частью научной работы по определению требований

к исходным данным о сейсмической опасности и уязвимости, используемым для оценки показателей риска на региональном уровне.

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

1. Актуализация данных об уровне сейсмической опасности и элементах риска

Авторы статьи придерживаются мнения о том, что оценка уровня сейсмической опасности для сейсмоопасных районов РФ, отнесённых к зонам опережающего развития, должна быть актуальной. Каждый акт крупных финансовых вложений в развитие таких регионов, по возможности, должен сопровождаться обновлением существующей оценки сейсмической опасности и риска. Оценки показателей риска, опирающиеся на актуализированные данные, важны на этапе планирования превентивных мероприятий, обеспечивающих успешную реализацию проектов и снижение возможного ущерба. Таким образом, оценка риска становится непрерывным процессом, сопровождающим планирование и реализацию планов развития сейсмоопасных регионов.

В статье представлены результаты оценки сейсмического риска территорий Иркутской области и Республики Бурятия. Согласно актуализированной схемы регионализации Северной Евразии для территории РФ, Иркутская область и Республика Бурятия относятся к Байкальскому сейсмическому региону общей площадью 1.53 млн км², характеризующему высоким уровнем сейсмической опасности, где возможны землетрясения с $M_{\max}=8 \pm 0.2$ [Уломов и др., 2016].

Использованные в работе исходные данные, необходимые для расчётов риска, опираются на прогноз сейсмической опасности. Актуальность прогноза подтверждается авторами на ближайшие 10–15 лет [Уломов и др., 2016]. Эти данные представлены зонами на картах общего сейсмического районирования (ОСР-2016). Зоны отличаются максимальной интенсивностью возможных сотрясений за установленный промежуток времени. Кроме карт имеются матрицы вероятностей каждого значения интенсивности, определённые в узлах сетки, характеризующихся координатами (B , L). Карты и матрицы полностью покрывают территорию изучаемых регионов. Следует отметить, что сравнение результатов применения карт ОСР и матриц в качестве исходных данных позволяет сделать вывод

о том, что последние дают более точные значения оценки величины показателей риска.

Оценки сейсмического риска для изучаемых регионов имеют свою историю. В 2007 г. были получены оценки с применением серии карт ОСР-1997 (А, В, С) [Уломов, Шумилина, 1999; Ларионов и др., 2012].

Используемый в качестве исходных данных комплект карт ОСР-2016 и соответствующий им набор цифровых данных сформирован с применением постоянно модифицируемой и пополняемой базы данных ОСР-2012 и ОСР-2014. С точки зрения авторов статьи, в условиях неоднозначности оценок опасности территории РФ было правильным использовать в приведённой работе более актуальные оцен-

ки сейсмической опасности, заложенные в картах ОСР-2016. При расчётах, необходимых для прогноза интенсивностей и их вероятностей, авторами карт использовались разные модели сейсмического режима, такие как классическая экспоненциальная в ОСР-2012 и комбинированная экспоненциально-гистограммная, впервые применённая в ОСР-1997 и в ОСР-2014 [Уломов и др., 2016]. В основу используемого для оценки риска комплекта карт ОСР-2016 положена актуализированная линейно-доменно-фокальная модель зон возникновения очагов землетрясений. Фрагмент карты линейно-доменно-фокальных зон для региона Иркутской области и Республики Бурятия показан на рис. 1.

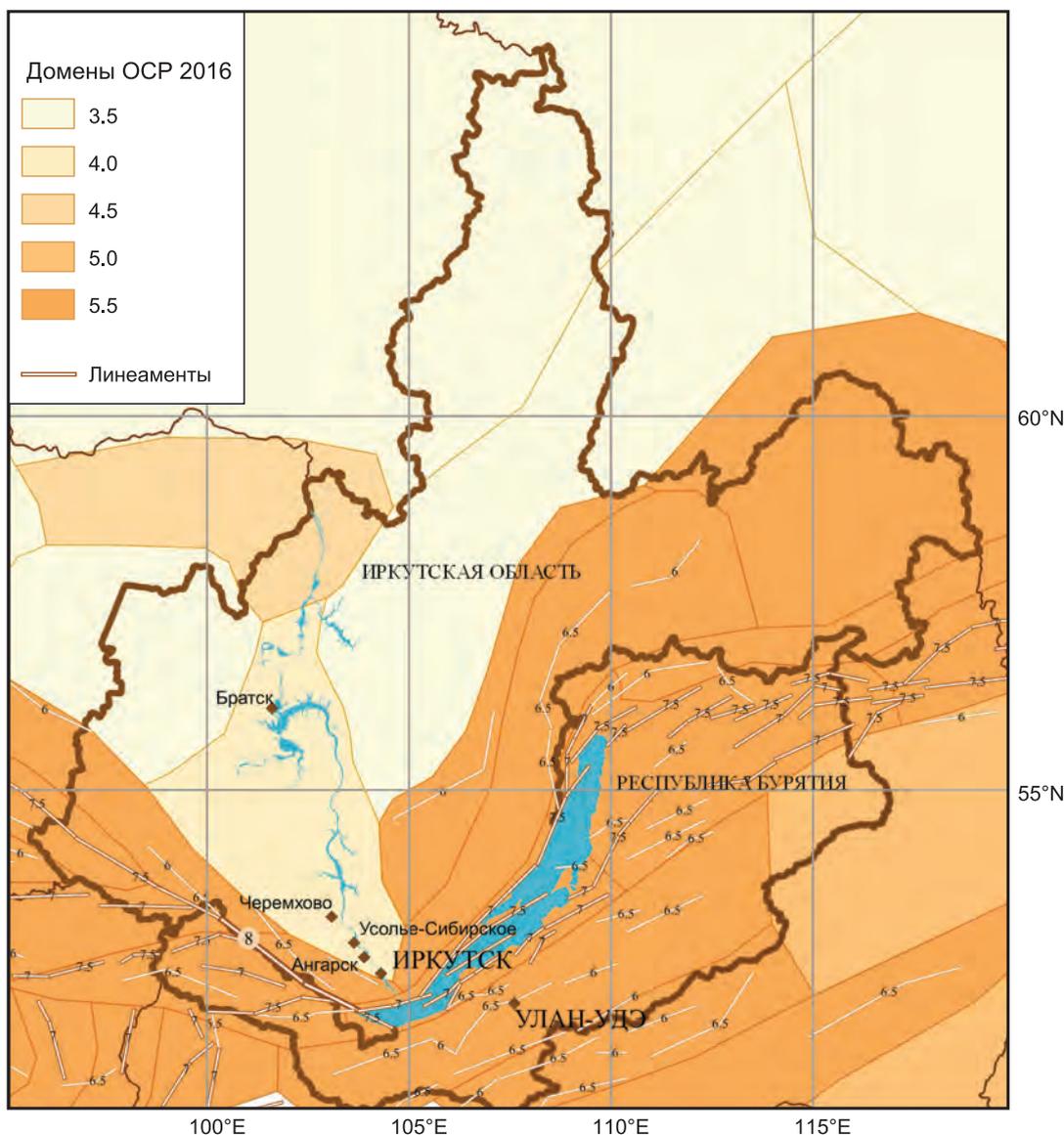


Рис. 1. Фрагмент карты актуализированной линейно-доменно-фокальной модели зон ВОЗ для изучаемого региона

Представленная на рис. 1 карта стала основой для формирования матрицы вероятностей различных интенсивностей. С использованием матрицы построен набор карт ОСР-2016.

По замыслу авторов статьи, для инвестиционной составляющей плана опережающего развития регионов в первую очередь потребуется обзорная карта сейсмического риска, содержащая данные о возможном социальном и экономическом ущербе, отнесённом к населённым пунктам регионов. Из этого следует, что основными элементами риска, состояние которых будет отображаться в результатах исследования, будут оценки социальных и экономических показателей риска, обусловленного сейсмическим воздействием, для населённых пунктов изучаемого региона.

В результате обновления исходной информации, в список населённых пунктов Иркутской области, приложенный к картам ОСР-1997, добавлены 251 и удалены 26 строк, соответствующих внесённым и утраченным населённым

пунктам. Все населённые пункты, внесённые в итоговый список, сопровождаются значениями сейсмической опасности с карт ОСР-2016. Для 72 населённых пунктов Иркутской области значения сейсмической интенсивности, взятые в своё время с карт ОСР-1997, при обновлении таблиц не изменились. Другими словами, отмечено совпадение 72 записей в таблицах ОСР-1997 и ОСР-2016. В 98 населённых пунктах Иркутской области произошли изменения, отмечаемые хотя бы для одной из серии комплекта карт ОСР-2016 (А, В, С). Аналогичное сравнение списков населённых пунктов Республики Бурятия также показывает наличие изменений. В список включены 152 новых населённых пункта, удалены 14. Неизменными остались оценки интенсивности и её вероятности для 31 поселения. Изменены показатели сейсмичности 63 населённых пунктов.

В табл. 1 приведены значения прогнозируемой интенсивности для отдельных населённых пунктов по картам ОСР-1997 и ОСР-2016.

Таблица 1. Отдельные населённые пункты Иркутской области и Республики Бурятия с указанием балльности по картам ОСР-1997 и ОСР-2016

Города	ОСР-1997			ОСР-2016		
	А	В	С	А	В	С
Иркутская область						
Иркутск	8	9	9	8	8	9
Алзамай	6	7	7	6	7*	7
Ангарск	8	8	9	8	8	9
Байкальск	9	9	10	8	9	>9
Бирюсинск	6	6	7	6	6	7
Бодайбо	7	7	8	7	7	8
Братск	—	—	6	—	6	7*
Вихоревка	—	—	6	—	6	7
Железногорск-Илимский	—	—	—	—	—	6
Зима	7	7	8	7	8*	9*
Киренск	6	6	7	6	7	8*
Нижнеудинск	7	7	8	7	7	8
Саянск	7	7	8	7	7	8
Свирск	7	8	9	7	8	9
Слюдянка	8	9	10	9	9	>9
Тайшет	6	6	7	6	6	7
Тулун	7	7	8	7	7	8
Усолье-Сибирское	7	8	9	8*	8	9
Усть-Илимск	—	—	—	—	—	6
Усть-Кут	—	6	6	6	6	7
Черемхово	7	8	9	7	8	9
Шелехов	8	9	10	8	9*	9
Республика Бурятия						
Улан-Удэ	8	8	9	8	8	9
Северобайкальск	9	9	10	9	9	>9
Гусиноозерск	—	—	—	8	8	9
Кяхта	8	8	9	7	8	9
Закаменск	7	8	9	7	8	9
Бабушкин	9	9	10	8	9	>9

Сравнение одноимённых значений табл. 1 показывает, что в целом оценки уровня сейсмической опасности уменьшились в ряде населённых пунктов.

В процессе подготовки к расчётам показателей риска было уточнено распределение населения Иркутской области и Республики Бурятия по населённым пунктам. Для уточнения численности населения использовалась информация Росстата (<https://rosstat.gov.ru>). На рис. 2 и 3 приводится пример изменения численности населения Иркутской области по состоянию на 2007 и 2020 гг. (за 13 лет).

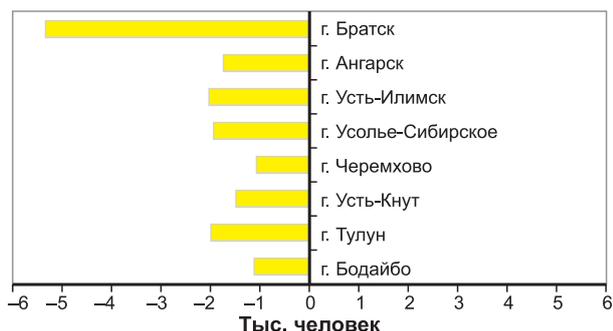


Рис. 2. Изменение численности населения в городах и посёлках городского типа Иркутской области по состоянию на 2007 и 2020 гг.

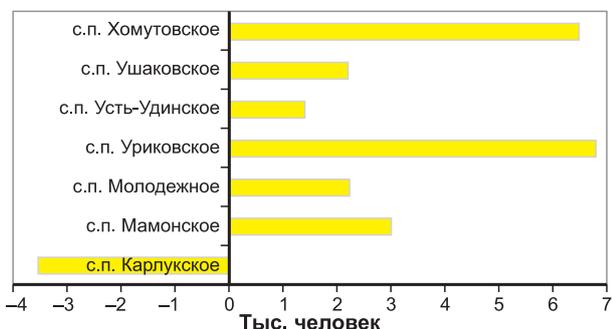


Рис. 3. Изменение численности жителей в сельских населённых пунктах Иркутской области по состоянию на 2007 и 2020 гг.

Сравнение численности населения, проживающего в различных поселениях Иркутской области по состоянию на 2007 и 2020 гг., показывает её отрицательную динамику для крупных населённых пунктов. Для этой категории населённых пунктов численность снизилась на 2–5%. В сельских поселениях преобладает увеличение числа жителей, которое достигает в среднем 20%. Несмотря на различный уровень изменчивости числа жителей в городах и сёлах, он не может повлиять на изменение показателя риска. Гораздо более сильное влияние в данном случае

оказывают изменения распределения населения по зданиям с различной уязвимостью. Планы опережающего развития регионов могут существенно изменить отмеченную за 13 лет динамику численности, однако получить информацию об этом возможно только по завершению процесса планирования.

Местоположение населённых пунктов для обзорной карты сейсмического риска задано координатами центра (B, L), привязанного к границе жилой зоны населённого пункта.

Таким образом, основным результатом актуализации данных об уровне сейсмической опасности территории стали матрицы вероятностей каждого значения интенсивности, определённые в узлах сетки, покрывающей исследуемое пространство. Для каждого узла вычислены вероятности P_i событий, характеризующихся интенсивностями ($I \leq 5$; $I=6$; $I=7$; $I=8$; $I=9$; $I > 9$).

Основным результатом актуализации списка элементов риска является: уточнение численности жителей и тенденции к её изменению.

Далее представлены результаты актуализации данных о сейсмической уязвимости элементов риска.

2. Актуализация данных об уязвимости элементов риска, расположенных в пределах Иркутской области и Республики Бурятия

За 15 лет, прошедших с момента первичного получения оценок риска, в Иркутской области и Республике Бурятия произошли землетрясения, которые позволили уточнить расчётную модель оценки показателей, характеризующих сейсмическую безопасность населения.

Благодаря полученным данным были уточнены следующие элементы расчётной модели: функции уязвимости для каждого класса зданий жилой застройки; функции уязвимости людей, оказавшихся в повреждённых зданиях (фиксируют вероятность гибели или травмы в зависимости от степени повреждения здания).

Изменения в описание уязвимости вносились по материалам, полученным из результатов детального обследования территории и описаний последствий землетрясений последних лет. Максимальное внимание уделено описаниям Култукского события 27 августа 2008 г. с $M=6.2$. Следует отметить, что землетрясение 27 августа нельзя считать настоящей проверкой сейсмической надёжности жилищного фонда городов Прибайкалья. Тем не менее, оно стало средством уточнения функций уязвимости зданий.

Здания и сооружения с пороговым сейсмическим воздействием 8–10 баллов попали в зоны и подверглись воздействиям, меньшим, чем расчётная сейсмическая нагрузка, на 2 балла. Максимальная интенсивность 8 баллов была достигнута только в районе, ближайшем к эпицентру (пос. Утулик). Тем не менее, это землетрясение было первым с 1959 г., при котором здания получили серьёзные повреждения. Следует отметить, что в данном случае повреждения наблюдались не столько из-за высокой интенсивности подземных толчков (7–8 баллов в эпицентре по шкале MSK-64), сколько в силу низкого качества строительства и физического износа конструкций.

Исследование последствий показало [Бержинский и др., 2010], что состояние многих строений в сейсмоопасных населённых пунктах внушает опасения: постройки 1960-х гг. и крупнопанельные жилые дома постройки 1970–1980-х гг. с наружными стенами из газозолобетона. Их физический износ, по данным Иркутского государственного технического университета (ИрГТУ), привёл к деградации структуры материала стеновых панелей со снижением прочности в 2–3 раза.

Подробная и актуальная информация об особенностях уязвимости застройки региона приводится в работе [Бержинский и др., 2009]. Застройка посёлка Култук, которая является типичной для региона, была представлена, в основном, одноэтажными жилыми домами (частный сектор) и отличалась значительным физическим износом. Процент износа жилищного фонда был высок и составлял: для одно- и двухэтажных деревянных (в т.ч. из бруса) жилых домов порядка 40–70%; для крупнопанельных 1–3-этажных

жилых домов от 15 до 40%; для кирпичных 1–3-этажных жилых домов от 20 до 40%. В застройке населённых пунктов ещё встречаются одноэтажные деревянные жилые дома барачного типа. Их износ близок к предельному значению (к полному износу).

В целом жилой фонд Слюдянского района, как и многих других, характеризовался высоким дефицитом сейсмостойкости. Для населённых пунктов региона он оценивался в баллах шкалы MSK-64. Для трёх характерных населённых пунктов дефицит в среднем составил: Слюдянка – 2.0; Байкальск – 1.0; Култук – 3.0. Распределение застройки отдельных населённых пунктов на момент обследования Култукского землетрясения 2008 г. приведено в табл. 2.

По результатам обследования зданий после Култукского землетрясения, выполненного сотрудниками ИЗК СО РАН [Бержинский и др., 2010], были уточнены модели населённых пунктов Иркутской области и Республики Бурятия. В табл. 3 приведён пример актуализированной модели застройки для городов Байкальска и Слюдянки, подготовленной Ю.А. Бержинским.

В ГИС «Экстремум», которая применялась для оценки сейсмического риска, использована возможность выполнить расчёт интенсивности, при которой достигается фиксированная степень повреждения зданий. Расчёт выполнен, исходя из предположения о том, что интенсивность – случайная величина, которая имеет нормальное распределение, характеризующее значением математического ожидания и дисперсии. Эти параметры были установлены на основе эмпирических данных о поведении зданий и сооружений во время землетрясений, а также во время вибрационных испытаний эталонных объектов.

Таблица 2. Распределение жилой застройки в Слюдянском районе

Населённый пункт	Распределение жилищного фонда (муниципального) по типам зданий, тыс. м ² /%				Всего тыс. м ² /%
	кирпичные	крупнопанельные	деревянные	прочие	
Слюдянка	93.0/35%	32.0/12%	120.0/45%	21.0/8%	266.0/100%
Байкальск	23.2/8%	140.8/48%	128.4/43%	2.6/1%	295.0/100%

Таблица 3. Процент зданий, отнесённых к разным классам уязвимости в соответствии со шкалой MMSK-86, и их средние высоты

Населённый пункт	A, %	h, м	B, %	h, м	B, %	h, м	C7, %	h, м	C8, %	h, м	C9, %	h, м
Байкальск	–		5	9	10	6	45	6	25	6	15	6
Слюдянка	–		10	6	40	6	15	3	30	9	5	9

Примечание: А, Б, В, С7, С8, С9 – классы уязвимости зданий, h – средние высоты зданий.

Таблица 4. Региональные параметры закона разрушения (функций уязвимости) в соответствии с региональной шкалой [Шерман и др., 2003]

Типы зданий по шкале MMSK-86	Степени повреждения зданий d				
	лёгкие $d=1$	умеренные $d=2$	тяжёлые $d=3$	частичное обрушение $d=4$	полное обрушение $d=5$
	Математическое ожидание интенсивности I , при которой здания получают разные степени повреждения				
А	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4
Б	6.4	7.4	8.4	9.4	10.4
В	6.7	8.0	9.1	10.1	11.0
С7	6.7	8.0	9.1	10.1	11.0
С8	7.3	8.7	9.8	10.7	11.3
С9	8.3	9.5	10.4	11.2	11.5

Дополнительно были использованы материалы региональной шкалы [Шерман и др., 2003]. Шкала (табл. 4) учитывает сейсмологические, инженерно-геологические и строительно-климатические особенности региона [Бержинский, 2001].

Среднеквадратичное отклонение интенсивности σ_I , равное 0.5, принято при расчётах риска для зданий всех классов уязвимости и для всех наблюдаемых степеней повреждения.

Зафиксированный в ходе исследования уязвимости повышенный износ зданий учитывался в расчётной модели смещением значений математического ожидания интенсивности I , при которой здания получают разные степени повреждения.

Таким образом, в пределах Иркутской области и Республики Бурятия была зафиксирована тенденция к заметному снижению уязвимости застройки, которую удалось учесть в расчётной модели изменениями, внесёнными в параметры функций уязвимости. Всё это позволяет оценить фактические значения показателей риска.

3. Процедура оценки показателей риска и построения региональных карт

Процедура оценки показателей риска включает ряд этапов, среди которых наиболее важными являются: уточнение параметров моделей сейсмической опасности и уязвимости застройки; сверка списков элементов риска и фиксация их на карте; описание свойств элементов риска в базе данных ГИС.

В базе данных ГИС «Экстремум» фиксируются класс уязвимости застройки, численность населения и его распределение по объектам застройки разного класса уязвимости. Подготовка данных и расчёт значений показателей риска

был выполнен с использованием специальных модулей системы. В состав ГИС кроме расчётных модулей вошли: база пространственных данных, объединённых в наборы (слои), включающие описание местности, источников сейсмической опасности, элементов риска; средства управления модулями и данными, оформленные как картографический пользовательский интерфейс. Всё это включено в состав ГИС «Экстремум», представляющей собой инструмент для имитационного моделирования потерь от землетрясений и анализа показателей сейсмического риска.

Применение ГИС позволило представить результаты расчёта показателей риска не только в таблицах, но и в виде тематических карт для наблюдения на экране пространственного распределения показателей риска. При анализе результатов расчёта, представленных на карте, становятся понятны причины роста и снижения показателя риска, зависящие от места его размещения по отношению к зонам с различным значением сейсмической опасности.

Для построения модели, позволяющей с достаточной точностью разместить в пространстве источники опасности и элементы риска, использовались географические карты различных масштабов, значение которых колеблется в пределах 1:100000 – 1:2500000. Цифровые и бумажные версии таких карт, хранящихся в Государственном картографо-геодезическом фонде Российской Федерации, доступны в соответствии с Законом Российской Федерации «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 30.12.2015 г. № 431-ФЗ.

Границы населённых пунктов и жилых кварталов были взяты с топографических карт масштаба 1:100000. В отдельных случаях они были

исправлены по снимкам местности, характеризующимися разрешающей способностью не хуже 2 м на местности.

Информация о сейсмической опасности, распределении населения, сейсмостойкости зданий и сооружений была внесена в тематическую базу данных системы «Экстремум» из других источников, приведённых ранее.

Технология оценки показателей риска предусматривает передачу средствами ГИС в расчётный модуль, предназначенный для вычисления показателя риска, совокупности данных об источнике опасности и уязвимости элементов риска.

Результат расчёта отображается в табличной форме и в виде тематической карты показателя риска. Система позволяет применить один из трёх способов построения тематических карт: способ значков, способ качественного фона и способ изолиний. Способ значков использовался для отображения показателей риска непосредственно в населённых пунктах. Размер значка был обусловлен числом жителей, уровень риска отображался различным цветом (рис. 4).

Применение ГИС «Экстремум» для оценки риска обеспечило автоматизацию процесса расчёта, снижение трудозатрат на выполнение всех операций, включая самые трудоёмкие, обусловленные сбором и согласованием данных между собой.

4. Карты социальных и экономических показателей сейсмического риска для Иркутской области и Республики Бурятия

Выбранные для расчёта показатели риска, ориентированные на их применение при разработке плана опережающего развития региона, отражают особенности планируемого демографического и экономического состояния регионов, обусловленного прогнозируемым землетрясением.

Для Иркутской области и Республики Бурятия с помощью системы «Экстремум» получены следующие показатели риска, обусловленные прогнозируемой сейсмической опасностью:

- вероятность (R_s1) смертельного исхода в случае землетрясения в год для любого индивидуума, проживающего на территории населённого пункта;

- вероятность (R_s2) смертельного исхода или травмы различной тяжести в год;

- вероятность (R_s3) смертельного исхода, или травмы, или ощутимых материальных убытков в год (вероятность пострадать);

- вероятность возникновения степеней повреждения d ($d=1, 2, 3, 4, 5$) зданиям населённых пунктов или физическая уязвимость зданий и сооружений от землетрясений;

- вероятность превышения установленной стоимости ремонта здания к его первоначальной стоимости или экономическая уязвимость зданий и сооружений от землетрясений.

На рис. 4 и 5 приведены карты индивидуального сейсмического риска R_s1 для населения Иркутской области и Республики Бурятия.

Двукратный расчёт одного и того же показателя риска (R_s1) с использованием данных из различающихся источников информации о сейсмической опасности позволил оценить величину расхождения в оценках риска. На основе такой оценки удалось сформулировать рекомендации к выбору наиболее предпочтительной формы представления данных о сейсмической опасности при вычислении риска.

При использовании карт ОСР-2016 (рис. 4) и матриц сотрясаемости (рис. 5), в первом случае получаются завышенные оценки риска R_s1 . Площадь зоны риска, характеризующая его высоким и весьма высоким значением в пределах Иркутской области, в случае ОСР-2016 на 6% больше (табл. 5) соответствующей площади зон, полученной по матрицам сотрясаемости (табл. 6). Сравнение числа жителей, попадающих в одноимённые зоны риска, отображённые на картах (рис. 4 и 5), показывает существенно отличающиеся значения. Число жителей, попадающих в зоны высокого риска, в двух расчётах отличается почти в два раза. Меньшее число получается при расчётах по матрице (рис. 5). В любом случае вариант расчёта по картам ОСР даёт завышенные значения показателей риска.

Причиной расхождения оценок риска является определённая генерализация, применяемая при построении карт ОСР по матрицам сотрясаемости.

Расчёт риска осуществляется с использованием пар значений (интенсивность и её вероятность). Обратный переход от зон, отображаемых на карте ОСР, к значениям интенсивности и её вероятности в узлах матрицы приводит к расхождениям в перечисленных значениях.

Из анализа табл. 5 и 6 следует, что уменьшение площадей и количества жителей, подверженных риску, является тенденцией. В то же время, эта тенденция не прослеживается для крупных населённых пунктов. В табл. 7 приведены значения риска R_s1 для крупных городов Иркутской области и Республики Бурятия.

Таблица 5. Характеристика зон, отличающихся значениями индивидуального сейсмического риска $R_s 1$, вычисленных по карте ОСР-2016

Границы интервалов риска, 10^{-5} , 1/год	Количественная характеристика риска	Площади зон. Иркутская область		Площади зон. Республика Бурятия	
		тыс. км ²	%	тыс. км ²	%
менее 1	малый	382	49	0	0
1–10	умеренный	181	23	52	15
10–20	средний	60	8	23	6
20–30	высокий	108	14	132	38
30–50	весьма высокий	43	6	145	41

Таблица 6. Характеристика зон, отличающихся значениями индивидуального сейсмического риска $R_s 1$, вычисленных по матрице сотрясаемости

Границы интервалов риска, 10^{-5} , 1/год	Количественная характеристика риска	Площади зон. Иркутская область		Площади зон. Республика Бурятия	
		тыс. км ²	%	тыс. км ²	%
менее 1	малый	422	54	0	0
1–10	умеренный	148	19	60	17
10–20	средний	91	12	65	19
20–30	высокий	70	9	90	25
30–50	весьма высокий	44	6	137	39

Таблица 7. Значения индивидуального сейсмического риска $R_s 1$, рассчитанные по карте ОСР-2016 и по матрице сотрясаемости

Населённый пункт	Субъект РФ	Население, тыс. чел.	Риск по матрицам 2016, 10^{-5} 1/год	Риск по картам ОСР-2016, 10^{-5} 1/год
Иркутск	Иркутская область	623	11.9	7.81
Ангарск	Иркутская область	225	8.63	7.81
Шелехов	Иркутская область	48	20.0	7.81
Слюдянка	Иркутская область	18	12.9	13.0
Байкальск	Иркутская область	13	9.43	9.72
Улан-Удэ	Республика Бурятия	435	13.2	9.39
Гусиноозёрск	Республика Бурятия	23	11.2	9.39
Северобайкальск	Республика Бурятия	24	29.5	28.5
Кяхта	Республика Бурятия	20	6.51	9.39
Селенгинск	Республика Бурятия	14	22.7	28.5
Таксимо	Республика Бурятия	8	31.0	28.5

Нарушение отмеченной тенденции в крупных населённых пунктах свидетельствует о том, что в значительных по площади жилых зонах с высокой концентрацией застройки и населения возникают аномалии риска. Этот факт обусловлен тем, что матрицы имеют большую детализацию поля интенсивностей, чем карты ОСР, на которых локальные аномалии сглажены, что обусловлено их масштабом и генерализацией.

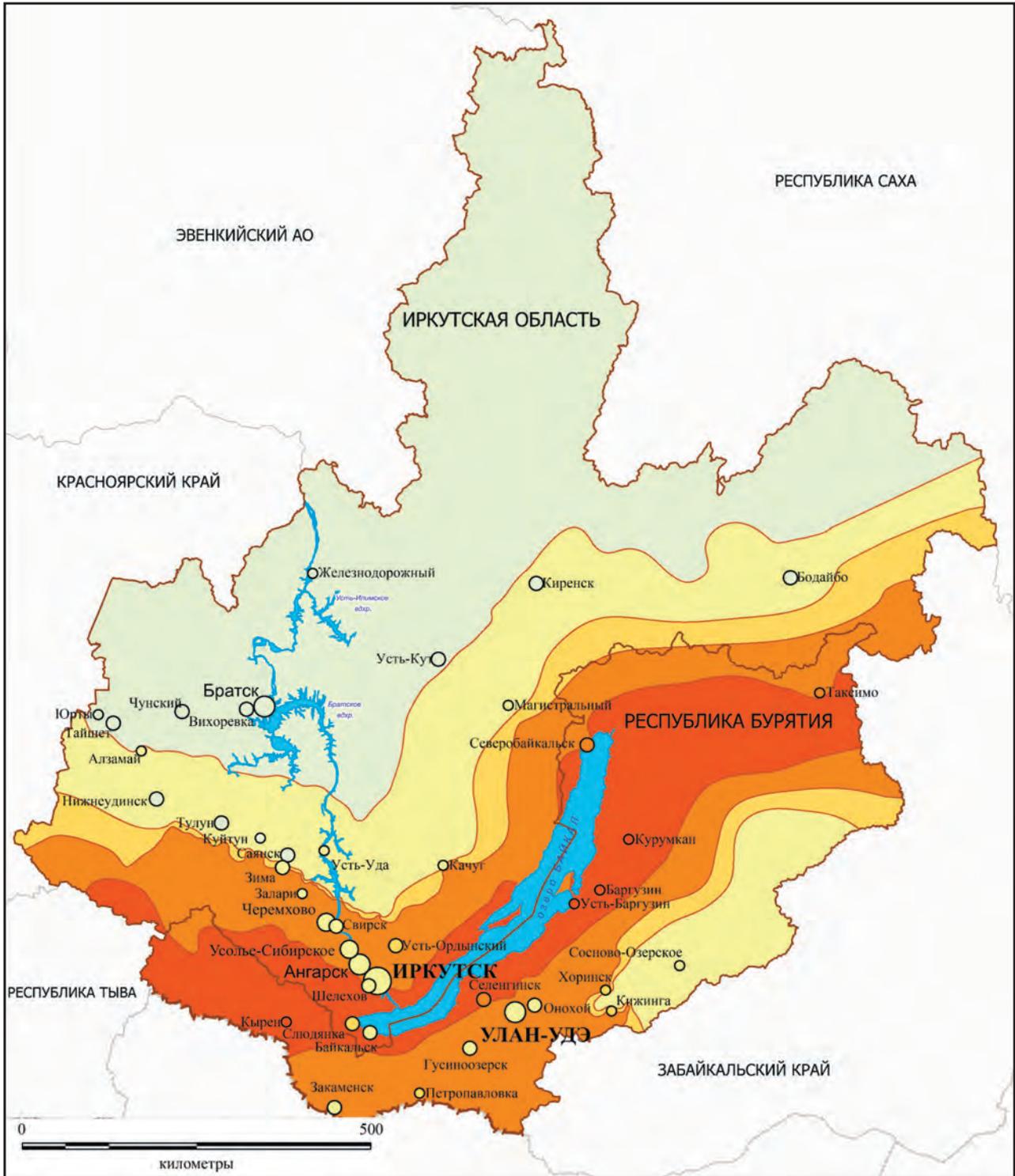
На рис. 6 и 7 приведены карты физической и экономической уязвимости объектов Иркутской области и Республики Бурятия, построенные с использованием матрицы сотрясаемости. Первая отображает процент зданий в населённых

пунктах, которые могут получить разные степени повреждения d ($d=1, 2, 3, 4, 5$). Вторая – отношение стоимости ремонта к первоначальной стоимости зданий.

Отображение пространственного распределения физической и экономической уязвимости на картах (рис. 6 и 7) территории Иркутской области и Республики Бурятия включает два элемента:

– средняя степень повреждения зданий и сооружений для малых населённых пунктов с численностью жителей менее 5000 человек;

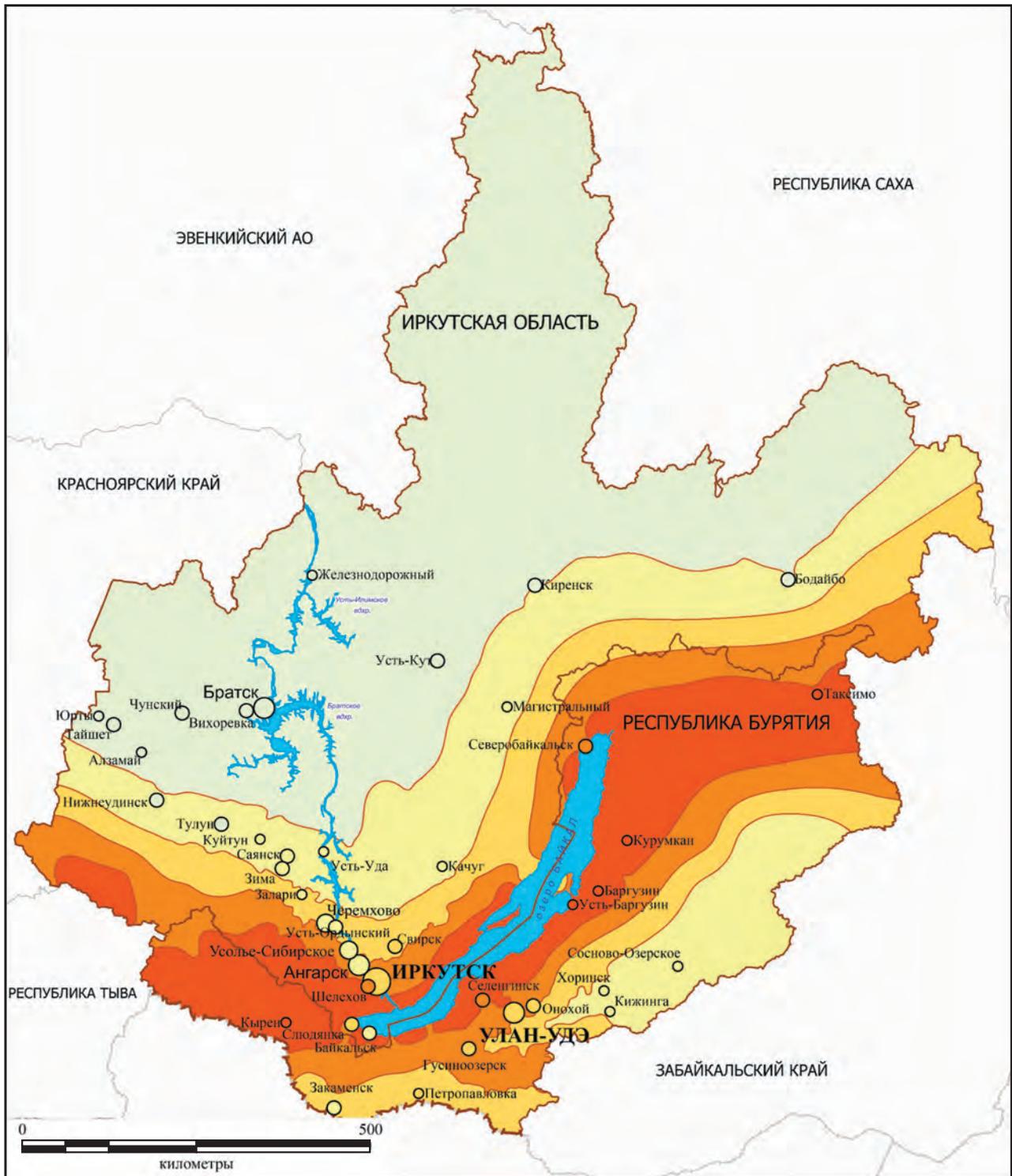
– средняя степень повреждения зданий и сооружений для крупных городов с численностью жителей более 5000 человек.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Рис. 4. Карта индивидуального сейсмического риска (показатель риска – $R_s 1$, вычислен с использованием в качестве источников информации о сейсмической опасности карты ОСР-2016)



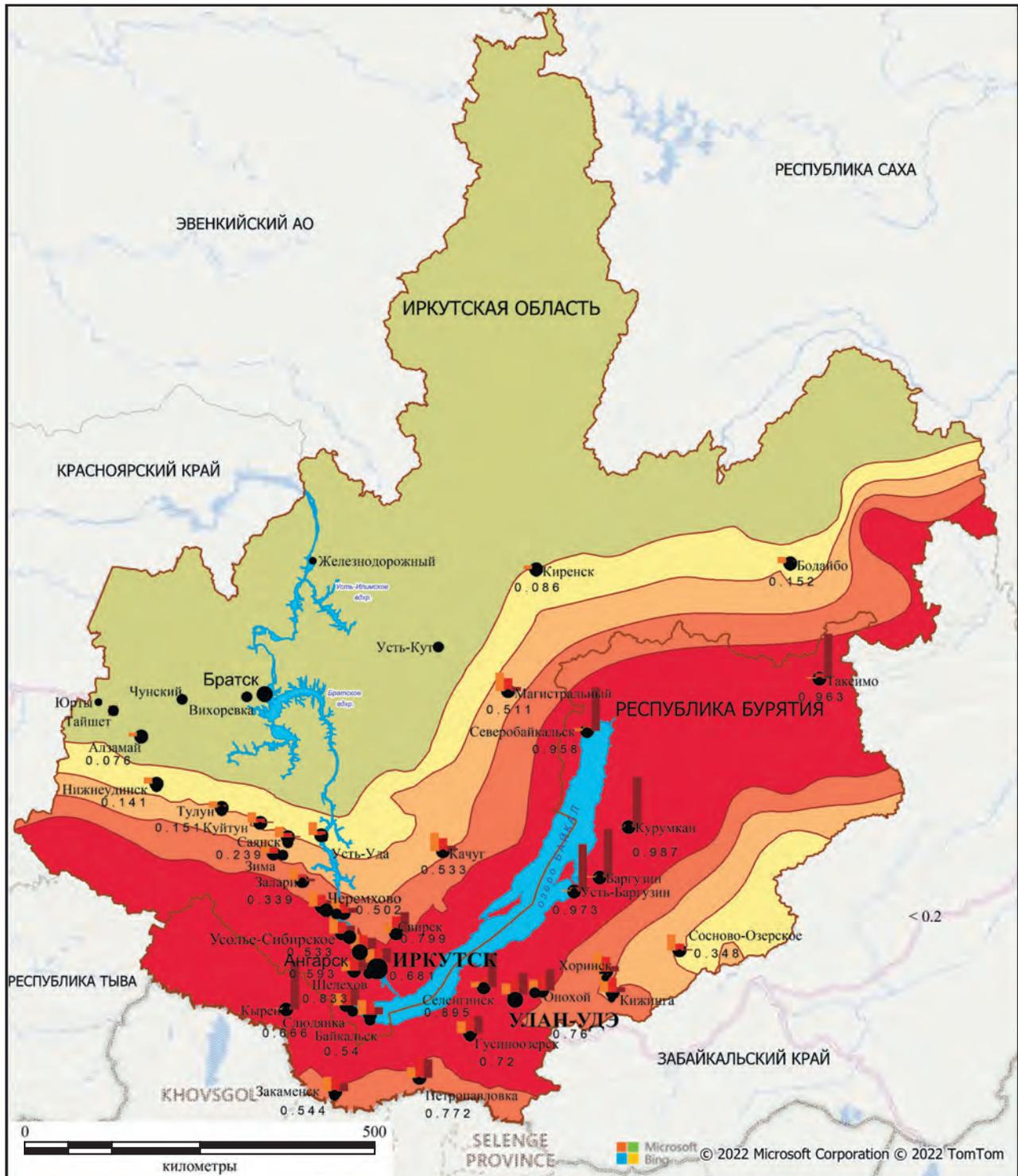
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Рис. 5. Карта индивидуального сейсмического риска (показатель риска – R_s1 , вычислен с использованием в качестве источников информации о сейсмической опасности матрицы сотрясаемости ОСР-2016)



Рис. 6. Карта физической уязвимости зданий и сооружений Иркутской области и Республики Бурятия: процент зданий в населённых пунктах, которые могут получить разные степени повреждения $d=1, 2, 3, 4, 5$. В качестве исходных данных о сейсмичности использована матрицы сотрясаемости



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Рис. 7. Карта экономической уязвимости: цифры – отношение стоимости ремонта к первоначальной стоимости зданий; в качестве исходных данных о сейсмичности использованы матрицы сотрясаемости

Для отображения тематической информации всех рассматриваемых элементов был использован аналог гипсометрической шкалы. При построении изолиний вычислялись значения показателей в точках, являющихся геометрическим центром населённых пунктов, и усреднялись в пределах элементарных площадок регулярной сетки со стороной ячейки 5 км. По усреднённым значениям показателей методом билинейной интерполяции были построены изолинии и определён цвет заправки соответствующей зоны. Для населённых пунктов Иркутской области и Республики Бурятия с численностью населения 5000 человек и более при отображении значений показателей использован метод карт-диаграмм и способ значков. Цвет соответствует определённой степени повреждения, а размер значка зависит от численности населения.

В табл. 8 приведён процент зданий для Иркутской области и Республики Бурятия, которые могут претерпеть разные степени повреждения при расчётах с использованием матрицы сотрясаемости ОСР-2016 (рис. 6).

В табл. 9 приведены интервалы значений экономической уязвимости (рис. 7) для Иркутской области и Республики Бурятия.

Территории Иркутской области и Республики Бурятия характеризуются весьма высокими показателями экономического риска. Значения показателя, превышающие 0,8, зафиксированы для 16% территории Иркутской области и для 66% территории Республики Бурятия.

5. Обсуждение результатов

Исследование по актуализации оценок сейсмического риска выполнено с акцентом на методический аспект работы. Рассматриваются этапы работ, характерные для оценки показателей сейсмического риска.

Первым и наиболее важным этапом работ по актуализации оценок сейсмического риска был прогноз сейсмической опасности. Необходимость прогноза сейсмической опасности обусловлена как сохраняющимся высоким уровнем сейсмической опасности, так и планами опережающего экономического развития регионов. При высоком уровне риска в план должны быть включены меры по его снижению. Планы должны опираться на обоснованные оценки сейсмической опасности, позволяющие предусмотреть соответствующие меры, направленные на снижение риска.

Таблица 8. Площади зон с разным уровнем физической уязвимости Иркутской области и Республики Бурятия по матрице сотрясаемости – процент зданий в населённых пунктах, которые могут получить разные степени повреждения $d=1, 2, 3, 4, 5$

Степени повреждений	Иркутская область		Республика Бурятия	
	Площадь, тыс. км ²	%	Площадь, тыс. км ²	%
Нет повреждений $d=0$	289.9	37.4	0	0.0
Лёгкие $d=1$	104.4	13.5	0	0.0
Умеренные $d=2$	91.2	11.8	12.5	3.6
Тяжёлые $d=3$	103.7	13.4	52.8	15.0
Частичные обрушения $d=4$	125.6	16.2	117.3	33.4
Полное обрушение $d=5$	59.9	7.7	168.7	48.0

Таблица 9. Размеры площадей зон с разным уровнем экономической уязвимости Иркутской области и Республики Бурятия по матрице сотрясаемости

Границы интервалов	Иркутская область		Республика Бурятия	
	Площадь, тыс. км ²	%	Площадь, тыс. км ²	%
0.0–0.2	413.3	53.0	0.0	0.0
0.2–0.4	78.6	10.0	21.3	6.0
0.4–0.6	76.7	10.0	31.1	9.0
0.6–0.8	83.3	11.0	65.9	19.0
0.8–1.0	122.9	16.0	233.1	66.0

Особенность оценки сейсмической опасности состоит в форме представления её результата. Для повышения качества оценки сейсмического риска было предложено использовать растровую цифровую форму (матрицу) значений вероятностей каждого возможного балла сейсмической интенсивности. Сравнение результатов оценки риска по матрице и карте ОСР-2016 показало их ощутимую разницу (в среднем 21% от номинала). Следует отметить, что карты дают, в основном, завышенное значение оценок риска. Растровое представление (матрицы) вероятности каждого балла интенсивности, делает оценку риска более надёжной.

Результатами второго этапа исследования стала уточнённая оценка уязвимости зданий и сооружений, которую сформировал их износ. Высокий уровень износа – фактор, который более всего влияет на уязвимость зданий и сооружений подавляющего большинства населённых пунктов Иркутской области и Республики Бурятия. Следует отметить, что решающую роль в получении новых данных об уязвимости сыграли методы наблюдения за реакцией зданий различных классов уязвимости на события сравнительно слабые и средние по интенсивности проявлений. Наблюдения велись в течение последних 15 лет, что позволило выявить наличие ветхого и аварийного жилья, а также объектов социального назначения постройки 60-х, 70-х, 80-х гг. прошлого века, конструкция и материал которых не соответствуют прогнозируемому уровню сейсмичности территории. Обобщённые оценки жилого и социального фонда строений позволили зафиксировать высокий уровень дефицита сейсмостойкости, достигающий в отдельных населённых пунктах, например, в Култуке, 3 баллов. Результаты оценки уязвимости населённых пунктов Иркутской области и Республики Бурятия, в формирование которых внёс значительный вклад Ю.А. Бержинский, позволили построить обновлённую карту сейсмического риска, фиксирующую текущее состояние застройки.

Вполне понятно, что планы опережающего развития территории должны предусмотреть меры по снижению уязвимости жилого и социального фонда зданий. В случае реализации этих планов соответственно изменятся и показатели риска. Таким образом, при разработке плана может быть поставлена задача оценки эффективности вложения средств в развитие жилого и социального фонда на основе моделирования, позволяющего сравнить предотвращённый ущерб с затратами на его предотвращение.

Выводы

В статье подтверждена целесообразность периодического обновления оценок сейсмического риска для обоснования в планах опережающего развития территорий превентивных мероприятий, направленных на снижение возможного ущерба.

Приводится описание процедуры оценки и представления на картах социальных и экономических показателей сейсмического риска с помощью географической информационной системы «Экстремум». Выбранные для расчёта и отображения на карте показатели риска ориентированы на применение при планировании опережающего развития сейсмоопасного региона. Оценка показателей риска была выполнена методом математического моделирования с использованием географической информационной системы «Экстремум». Средствами ГИС в цифровой форме, удобной для применения в расчётах, были представлены данные о сейсмической опасности, уязвимости населённых пунктов и их жителей. Использование ГИС позволило оформить результаты оценки риска в виде тематических карт, на которых цветом представлены зоны с различными показателями риска и легко идентифицируются его аномальные значения. Шкала легенды к карте риска позволяет быстро обнаружить аномальные зоны, отмеченные цветом.

Важным результатом исследования является выбор формы представления данных о сейсмической опасности в виде матриц вероятности интенсивности разных баллов. Применение такого представления для расчёта риска даёт уточнение его оценки в отдельных точках по сравнению с традиционной формой в виде карт ОСР на 30%.

Особую ценность с точки зрения авторов представляют наблюдения за поведением зданий и сооружений в течение последних 15 лет, организуемые по поводу различных по силе сейсмических проявлений на поверхности, а также результаты вибрационных испытаний эталонных объектов, выполненных ИЗК СО РАН. Такие наблюдения позволяют уточнить параметры функций уязвимости для каждого особо уязвимого класса застройки. Результаты выполненных наблюдений были использованы при расчёте риска. В результате были получены оценки застроенной части населённых пунктов, площадь которой изменяется в пределах от 15% до 65% и характеризуется уровнями риска, обозначаемыми как «высокий», так и «весьма высокий».

Полученные авторами тематические карты иллюстрируют весьма высокие оценки индивидуального риска для 6% территории Иркутской области и для 39% территории Республики Бурятия, свидетельствуют о необходимости и важности обеспечения сейсмобезопасности населения в рамках планирования мероприятий опережающего развития территорий.

Разработанная авторами геоинформационная модель оценки сейсмического риска предназначена для многократного использования, в том числе, с данными об уязвимости, закладываемыми в проект развития территорий. Сформированные в результате расчётов карты риска для каждого конкурентного набора превентивных мероприятий позволяют уменьшить ожидаемые социальные и экономические потери от сильных землетрясений на 20–30%.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № 122022400105-9 «Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий», проектов МГТУ им. Н.Э. Баумана № 075-01304-20, № 075-11-2019-087 от 18.12.2019.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФЗ РАН А.Д. Завьялову и С.А. Перетокину за предоставление цифровой информации по оценке сейсмической опасности в соответствии с картами ОСР-2016 на изучаемую территорию, а также коллективу Центра исследований экстремальных ситуаций за их вклад в развитие системы «Экстремум». Особо авторы отмечают плодотворное многолетнее сотрудничество с коллективом ИЗК СО РАН, возглавляемым Ю.А. Бержинским, результаты которого использованы в данном исследовании.

Литература

Анисимова Н.Г., Артюхова И.С., Асоян Д.С., Аюбов Э.Н. и др. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации. – М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2005. – 271 с. – EDN: ZALZIZ

Бержинский Ю.А. Региональная макросейсмическая шкала для Прибайкалья: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. геол.-мин. наук. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2001. – 19 с.

Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Павленов В.А., Фролова Н.И. Последствия прогнозируемого землетрясения для Иркутска и региона // Сейсмологический мониторинг в Сибири и на Дальнем Востоке: Материалы научной сессии, посвящённой 100-летию сейсмической станции «Иркутск». – Иркутск, ИЗК СО РАН, 2002. – С. 200–206.

Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Иванькина Л.И., Ордынская А.П., Саландаева О.И., Чигринская Л.С., Акулова В.В., Черных Е.Н. Оценка сейсмической надёжности жилых и общественных зданий при землетрясении 27.08.2008 г. на Южном Байкале // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2009. – Т. 36, № 1. – С. 23–39. – EDN: KWCDFR

Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Имаев В.С. Оценка ущерба в результате землетрясения 27.08.2008 г. для урбанизированных территорий с учётом региональных особенностей затухания сейсмической интенсивности в Прибайкалье // Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Материалы XV Международной научно-практической конференции. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС, 2010. – С. 219–228. – EDN: NCHBDX

Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Ордынская А.П. Оценка уязвимости зданий с учётом сейсмического износа конструкций для расчёта сейсмического риска // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвящённого памяти профессора С.И. Шермана. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2021. – С. 171–172. – EDN: DTTENE

Гилёва Н.А., Кобелева Е.А., Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Чечельницкий В.В. Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. ($M_w=5.5$) в Южном Прибайкалье: предварительные результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2020. – Т. 47, № 4. – С. 55–71. DOI: 10.21455/VIS2020.4-4. – EDN: BBDWFE

Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А. Сильные землетрясения Прибайкалья в 2020–2021 гг. // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвящённого памяти профессора С.И. Шермана. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2021. – С. 182–183. – EDN: IEJEEX

Ларионов В.И., Суцев С.П., Угаров А.Н., Фролова Н.И. 4.5. Оценка сейсмического риска с применением ГИС-технологий // Природные опасности России. Т. 6: Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина. – М.: Издательская фирма «КРУК», 2003. – С. 209–231. – EDN: UXTFOX

Ларионов В.И., Фролова Н.И., Бержинский Ю.А., Бержинская Л.И., Саландаева О.И. Оценка природных и природно-техногенных рисков для Байкальского региона с применением ГИС-технологий // Экологический риск и экологическая безопасность: Материалы Третьей Всероссийской научной конференции с международным участием. Т. 2. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. – С. 206–208.

Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Габсатарова И.П., Суцев С.П., Малаева Н.С. Повышение надёжности оперативных оценок потерь от землетрясений на территории Чеченской Республики // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии

- Северного Кавказа: Коллективная монография. Т. X (в 2-х частях). Ч. 2 / Науч. ред.: академик РАН А.О. Глико, д.ф.-м.н., профессор И.А. Керимов. – Грозный: Изд-во «ООО Формат», 2020а. – С. 145–155.
- Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Габсатарова И.П., Суцев С.П., Малаева Н.С.* Управление сейсмическим риском в рамках АИУС РСЧС: на примере Северного Кавказа // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2020б. – № 2 (81). – С. 33–47. DOI: 10.33580/2541-9684-2020-81-2-33-47. – EDN: OSXWDA
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Н.А., Масальский О.К., Чечельницкий В.В.* Сейсмичность Байкальской рифтовой зоны за период цифровой регистрации землетрясений (2001–2006 гг.) // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2009. – Т. 36, № 1. – С. 40–55. – EDN: KWCDGB
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И.* Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с $M_w=6.3$, $I_0=8-9$ (Южный Байкал) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 386–407. – EDN: UDUBOV
- Методика прогнозирования последствий землетрясений.* – М.: ВНИИ ГОЧС – ЦИЭКС – Сейсмологический центр ИГЭ РАН, 2000. – 27 с.
- Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г., Гусев А.А., Гусев Г.С. и др.* Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-2016. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населённых пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. – 2016. – № 7. – С. 49–122. – EDN: WJDTLZ
- Осинов В.И., Фролова Н.И., Суцев С.П., Ларионов В.И.* Оценка сейсмического и природного риска для населения и территорий Российской Федерации // Экстремальные природные явления и катастрофы: в 2 т. Т. 2: Геология урана, геоэкология, гляциология / Отв. ред. В.М. Котляков. – М.: Изд-во «ПРОБЕЛ 2000», 2011. – С. 28–48. – EDN: QKJSGF
- Осинов В.И., Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н. и др.* Оценка и картирование сейсмического и природного риска // Природные риски: анализ, оценка, картографирование: Материалы Международной научной конференции. – М.: Изд-во МГУ, 2013. – С. 134–140.
- Осинов В.И., Ларионов В.И., Суцев С.П., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Кожаринов С.В., Барская Т.В.* Оценка сейсмического риска территории г. Б. Сочи // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2015. – № 1. – С. 3–19. – EDN: TNRUMN
- Радзиминович Я.Б., Имаев В.С., Радзиминович Н.А., Ружич В.В., Смекалин О.П., Чипизубов А.В.* Эффекты Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. с $M_w=6.3$ в ближней к эпицентру зоне: результаты макросейсмического обследования // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2009. – Т. 36, № 1. – С. 56–71. – EDN: KWCDGL
- Радзиминович Я.Б., Гилёва Н.А., Тубанов Ц.А., Лухнева О.Ф., Новопашина А.В., Цыдыпова Л.Р.* Макро-
- сейсмические проявления Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 г. ($M_w=5.5$) на Среднем Байкале // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвящённого памяти профессора С.И. Шермана. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2021. – С. 209–210. – EDN: VJCRXY
- Ружич В.В., Левина Е.А., Пономарева Е.А.* О возможности и результатах среднесрочного прогноза опасных землетрясений в Прибайкалье и его роли в снижении сейсмического риска // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы: Материалы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных учёных, посвящённого 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева / Под ред. С.В. Рассказова, С.П. Приминой. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2019. – С. 167–169. – EDN: OXXULU
- Суцев С.П., Ларионов В.И., Фролова Н.И.* Оценка и управление сейсмическим риском с применением ГИС «Экстремум» // Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: Материалы XV Международной научно-практической конференции. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010. – С. 327–346. – EDN: NCHBJR
- Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населённых пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 57 с.
- Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С.* Использование макросейсмических данных для повышения надёжности оперативных оценок потерь на примере землетрясений стран СНГ // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 292–296. – EDN: YPKONZ
- 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
- Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С.* Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на примере землетрясений в Албании // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2020. – № 5. – С. 62–77. DOI: 10.31857/S0869780920050033. – EDN: FUWMKB
- Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Суцев С.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С.* Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на Балканах (землетрясения в Хорватии 2020 г.) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2021а. – № 5. – С. 3–21. DOI: 10.31857/S0869780921050040. – EDN: UPNJQM

- Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Суцев С.П., Малаева Н.С. Калибровка модели геоинформационной системы «Экстремум» для оценки потерь от землетрясений // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. — 2021б. — Т. 5, № 4. — С. 427–446. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-4.427. — EDN: UZMMNE
- Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Суцев С.П., Малаева Н.С. Калибровка модели геоинформационной Системы «Экстремум» для оценки потерь от землетрясений Восточной Зоны Северного Кавказа // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2022а. — № 4. — С. 34–55. DOI: 10.31857/S0869780922040014. — EDN: GNXQXQ
- Фролова Н.И., Малаева Н.С., Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Суцев С.П., Ларионов В.И., Угаров А.Н. Оценка социальных и экономических показателей сейсмического риска на примере г. Ангарск // Геофизические процессы и биосфера. — 2022б. — Т. 21, № 2. — С. 86–113. DOI: 10.21455/gpb2022.2-5. — EDN: GMSGFT
- Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Лутиков А.И., Суцев С.П., Малаева Н.С. Оценка сейсмического риска на территории Ставропольского края // Геофизические процессы и биосфера. — 2022в. — Т. 21, № 4. DOI: 10.21455/gpb2022.4 (в печати)
- Шерман С.И., Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Антикаев Ф.Ф. Региональные шкалы сейсмической интенсивности. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. — 188 с. — EDN: QKEKXL
- Aguilar-Melendez A., Pujades L.G., De la Puente J., Barbat A.H., Ordaz S. M.G., Gonzalez-Rocha S.N., Welsh-Rodriguez C.M., Rodriguez-Loyola H.E., Lantada N., Ibarra L., Garcna-Elias A., Campos Rios A. Probabilistic assessment of seismic risk of dwelling buildings of Barcelona. Implication for the city resilience // Urban Resilience for Risk and Adaptation Governance. Resilient Cities / G. Brunetta, O. Caldarice, N. Tollin, M. Rosas-Casals, J. Morató (eds.). — Cham: Springer, 2019. — P. 229–265. DOI: 10.1007/978-3-319-76944-8_13
- Crowley Y., Colombi M., Borzi B., Faravelli M., Onida M., Lopez M., Polli D., Meoni F., Pinho R. A comparison of seismic risk maps for Italy // Bulletin of Earthquake Engineering. — 2009. — V. 7, N 1. — P. 149–180. DOI: 10.1007/s10518-008-9100-7
- da Porto F., Dona M., Rosti A., Rota M., Lagomarsino S., Cattari S., Borzi B., Onida M., De Gregorio D., Perelli F.L., Del Gaudio C., Ricci P., Speranza E. Comparative analysis of the fragility curves for Italian residential masonry and RC buildings // Bulletin of Earthquake Engineering. — 2021. — V. 19. — P. 3209–3252. DOI: 10.1007/s10518-021-01120-1
- Dilley M., Deichmann U., Chen R.S., et al. Natural disaster hotspots: A global risk analysis. — Washington DC: World Bank Publications, 2005. — URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7376>
- Dolce M., Prota A., Borzi B., da Porto F., Lagomarsino S., Magenes G., Moroni C., Penna A., Polese M., Speranza E., Verderame G.M., Zuccaro G. Seismic risk assessment of residential buildings in Italy // Bulletin of Earthquake Engineering. — 2021. — V. 19. — P. 2999–3032. DOI: 10.1007/s10518-020-01009-5
- Frolova N.I. Seismic risk assessment and management in the Russian Federation // National Seismological Review of Russia (2007–2010) / A.O. Gliko, A.D. Zavyalov, A.A. Malovichko, G.A. Sobolev, V.I. Uloinov (eds.). — Moscow: GC RAS Publ., 2010. — P. 75–91.
- Frolova N., Larionov V., Bonnin J., Ugarov A. Seismic risk cartographic visualization for crisis management // Geography, Environment, Sustainability. — 2014. — V. 7, N 4. — P. 4–27.
- Frolova N., Bonnin J., Larionov V., Ugarov A. Complexity in seismic risk assessment at different levels with GIS technology application // Engineering Geology for Society and Territory. V. 5 / G. Lollino, A. Manconi, F. Guzzetti, M. Culshaw, P. Bobrowsky, F. Luino (eds.). — Cham: Springer, 2015. — P. 381–385. DOI: 10.1007/978-3-319-09048-1_73
- Giardini D., Grünthal G., Shedlock K.M., Zhang P. The GSHAP global seismic hazard map // Annali di Geofisica. — 1999. — V. 42, N 6. DOI: 10.4401/ag-3784
- Gomez-Zapata J.C., Brinckmann N., Harig S., Zafrir R., Pittore M., Cotton F., Babeyko A. Variable-resolution building exposure modelling for earthquake and tsunami scenario-based risk assessment: an application case in Lima, Peru // Natural Hazards and Earth System Science. — 2021. — V. 21. — P. 3599–3628. DOI: 10.5194/nhess-21-3599-2021
- Haslinger F., Basil R.I., Bossu R., Cauzzi C., Cotton F., Crowley H., Custódio S., Danciu L., Locati M., Michelini A., Molinari I., Ottemöller L., Parolai S. Coordinated and interoperable seismological data and product services in Europe: The EPOS thematic core service for seismology // Annals of Geophysics. — 2022. — V. 65, N 2. — DM213. DOI: 10.4401/ag-8767. OPEN ACCESS
- Jaiswal K.S., Wald D.J., Hearne M. Estimating casualties for large earthquakes worldwide using an empirical approach: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009–1136. — 2009. — 78 p. DOI: 10.3133/ofr20091136
- Li M., Zou Z., Xu G., Shi P. Mapping earthquake risk of the World // World Atlas of Natural Disaster Risk, IHDP/Future Earth-Integrated Risk Governance Project Series / P. Shi, R. Kaspersen (eds.). — Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. — P. 25–39. DOI: 10.1007/978-3-662-45430-5_2
- Meroni F., Squarcina Th., Pessina V., Locati M., Modica M., Zoboli R. A damage scenario for the 2012 Northern Italy earthquakes and estimation of the economic losses to residential buildings // International Journal of Disaster Risk Science. — 2017. — V. 8. — P. 326–341. DOI: 10.1007/s13753-017-0142-9
- Peduzzi P., Dao H., Herold C., Mouton F. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The disaster risk index // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2009. — V. 9, N 4. — P. 1149–1159. DOI: 10.5194/nhess-9-1149-2009
- Pittore M. Focus maps: a means of prioritizing data collection for efficient geo-risk assessment // Annals

- of Geophysics. – 2015. – V. 58, N 1. – S0107. DOI: 10.4401/ag-6692
- Radziminovich N.A., Gileva N.A., Melnikova V.I., Ochkovskaya M.G.* Seismicity of the Baikal rift system from regional network observations // Journal of Asian Earth Sciences. – 2013. – V. 62. – P. 146–161. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.10.029
- Radziminovich Y.B., Gileva N.A., Tubanov Ts.A., Lukhneva O.F., Novopashina A.V., Tsydyпова L.R.* The December 9, 2020, $M_w=5.5$ Kudara earthquake (Middle Baikal, Russia): Internet questionnaire hard test and macroseismic data analysis // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2022. – V. 20. – P. 1297–1324. DOI: 10.1007/s10518-021-01305-8
- Ranguelov B.* Seismic risk mapping – state of the art in the PECO countries. Pt. 2 [Электронный ресурс] // Space, ecology, nanotechnology, safety (SENS'2006). Proceedings of Second science conference with international participation. – Varna, Bulgaria, 2006. – URL: <http://www.space.bas.bg/astro/SES2006/CD/E8.pdf>
- So E., Spence R.* Estimating shaking-induced casualties and building damage for global earthquake events: a proposed modelling approach // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2013. – V. 11. – P. 347–363. DOI: 10.1007/s10518-012-9373-8
- Tyagunov S., Grunthal G., Wahlstrom R., Stempniewski L., Zschau J.* Seismic risk mapping for Germany // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2006. – V. 6, Is. 4. – P. 573–586. DOI: 10.5194/nhess-6-573-2006
- Zaalishvili V., Burdzjeva O., Kanukov A., Melkov D.* Seismic risk of modern city // The Open Construction and Building Technology Journal. – 2019. – V. 13. – P. 308–318. DOI: 10.2174/1874836801913010308
- Xin D., Daniell J., Wenzel F.* Review of fragility analyses for major building types in China with new implications for intensity-PGA relation development // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2019. DOI: 10.5194/nhess-2019-195. Preprint
- Xu Z., Wu S., Dai E., Li K.* Quantitative assessment of seismic mortality risks in China // Journal of Resources and Ecology. – 2011. – V. 2, N 1. – P. 83–90. DOI: 10.3969/j.issn.1674-764x.2011.01.012
- Zanini M.A., Hofer L., Pellegrino C.* A framework for assessing the seismic risk map of Italy and developing a sustainable risk reduction program // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2019. – V. 33. – P. 74–93. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2018.09.012. – EDN: NUYCOW
- Zanini M.A., Hofer L., Faleschini F., Pellegrino C.* The seismic risk map of Italy // Proceedings of the 6th International Workshop on Design in Civil and Environmental Engineering DCEE2017. – Cagliari, Italy, 2017.
- Zhang L., Tao Z., Wang G.* Assessment and determination of earthquake casualty gathering area based on building damage state and spatial characteristics analysis // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2022. – V. 67. – P. 102688. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102688. – EDN: OTFZZV
- Zuccaro G.* Inventory and vulnerability of the residential building stock at a national level, seismic risk and socio-economic loss maps [Электронный ресурс]. – Naples, Italy, 2004. – CD-ROM (In Italian).
- Zhongchun X.U., Shaohong W.U., et al.* Quantitative assessment of seismic mortality risks in China // Journal of Resources and Ecology. – 2011. – V. 2, N 1. – P. 83–90. DOI: 10.3969/j.issn.1674-764x.2011.01.012
- Wu Q., Zhang X.* The establishment of risk evaluation index system for small- and medium-sized agency book-keeping companies // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2022. – V. 2022. – A. 8701591. – 13 p. DOI: 10.1155/2022/8701591

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

Сушев 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 МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия. E-mail: garo@esrc.ru

Малаева Наталья Сергеевна, инженер ИГЭ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: natashamalaeva@yandex.ru

Updated indicators of seismic risk for the territory of the Irkutsk region and the Republic of Buryatia

© 2023 N.I. Frolova¹, S.P. Suchshev², A.N. Ugarov², N.S. Malaeva¹

¹IEG RAS, Moscow, Russia; ²BMSTU, Moscow, Russia

Received October 30, 2022

Abstract For all earthquake prone countries, including the Russian Federation, seismic risk assessment is periodically updated. The need for updating is increasing due to changes in assessments of hazard level and vulnerability properties of the elements at risk. For the earthquake prone regions of the Russian Federation classified as the priority development zones, risk indicators updating should increase the effectiveness of preventive measures implementation aimed at risk reduction. Calculations show that the development of risk maps, as well as the subsequent planning and implementation of preventive measures tied to the place marked on the map as the most dangerous, can reduce possible social and economic losses by 20-30%. The article describes the issues of updating seismic risk indicators for the territory of the Irkutsk region and the Republic of Buryatia. For the considered areas, which are included in the advanced development program, the actual values of seismic hazard and building vulnerability were used. The procedure for assessing and mapping risk indicators with the geographic information system “Extremum” application is given. Examples of thematic maps are presented, illustrating rather high estimates of individual risk for 6% of the territory of the Irkutsk region and 39% of the territory of the Republic of Buryatia. The results of the study indicate the need and importance of ensuring the seismic safety of the population in the framework of planning measures for the advanced development of territories.

Keywords Risk assessments updating, social and economic indicators of seismic risk, simulation modeling, Irkutsk region, Republic of Buryatia, information system “Extremum”.

For citation Frolova, N.I., Suchshev, S.P., Ugarov, A.N., & Malaeva, N.S. (2023). [Updated indicators of seismic risk for the territory of the Irkutsk region and the Republic of Buryatia]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(1), 26-50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.1.02>. EDN: QYVJPZ

References

- Anisimova, N.G., Artyukhova, I.S., Asoyan, D.S., Ayubov, E.N., et al. (2005). *Atlas prirodnykh i tekhnogennykh opasnostei i riskov chrezvychainykh situatsii v Rossiiskoi Federatsii* [Atlas of natural and technological man-made hazards and risks of emergency situations in the Russian Federation]. Moscow, Russia: Publishing and production center “Design. Information. Cartography”, 224 p. (In Russ.). EDN: ZALZIZ
- Berzhinsky, Yu.A. (2001). [Regional macroseismic scale for the Baikal region. Abstract of the dissertation for the degree of candidate of geological and mineralogical sciences]. Irkutsk, Russia, 19 p. (In Russ.).
- Berzhinsky, Yu.A., Berzhinskaya, L.P., Pavlenov, V.A., & Frolova, N.I. (2002). [Consequences of the predicted earthquake for the Irkutsk City and region]. In *Seismologicheskii monitoring v Sibiri i na Dal'nem Vostoke: Materialy nauchnoi sessii, posviashchennoi 100-letiiu seismicheskoi stantsii «Irkutsk»* [Proceedings Scientific Conference “Seismological monitoring in the Siberia and the Far East] (pp. 200-206). Irkutsk, Russia: IEC SB RAS Publ. (In Russ.). EDN: KWCDFR
- Berzhinsky, Yu.A., Berzhinskaya, L.P., Ivankina, L.I., Ordynskaya, A.P., Salandaeva, O.I., Chigrinskaya, L.S., Akulova, V.V., & Chernykh, E.N. (2009). [Estimation of seismic reliability of residential and public buildings during the earthquake on August 27, 2008 in Southern Baikal]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems of Engineering Seismology], 36(1), 23-39. (In Russ.). EDN: KWCDFR
- Berzhinsky, Yu.A., Berzhinskaya, L.P., & Imaev, V.S. (2010). [Estimation of damage due to the earthquake of August 27, 2008 for urbanized territories, taking into account regional features of attenuation of seismic intensity in the Baikal region]. In *Problemy zashchity naseleniia i territorii ot chrezvychainykh situatsii. Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the XV International Scientific-Practical Conference “Problems of protecting the population and territories from emergency situations”] (pp. 219-228). Moscow, Russia: VNII GOChS Publ. (In Russ.). EDN: NCHBDX
- Berzhinsky, Yu.A., Berzhinskaya, L.P., & Ordynskaya, A.P. (2021). [Assessment of buildings vulnerability

- taking into account the seismic wear of structures in order to calculate the seismic risk]. In *Razlomoobrazovanie v litosfere i soputstvuiushchie protsessy: tektonofizicheskii analiz: Tezisy докладов Vserossiiskogo soveshchaniia, posviashchennogo pamiati professora S.I. Shermana* [Abstracts of the reports of the All-Russian meeting dedicated to the memory of Professor S.I. Sherman “Faulting in the lithosphere and related processes: tectonophysical analysis”] (pp. 171-172). Irkutsk, Russia: ISU Publ. (In Russ.). EDN: DTTEHE
- Gileva, N.A., Kobeleva, E.A., Radziminovich, Ya.B., Melnikova, V.I., & Chechel'nitsky, V.V. (2020). [The Bystrinskoe earthquake on September 21, 2020 (Mw=5.5) in the Southern Baikal region: preliminary results of instrumental and macroseismic observations]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems of Engineering Seismology], 47(4), 55-71. (In Russ.). DOI: 10.21455/VIS2020.4-4. EDN: BBDWFE
- Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Radziminovich, Ya.B., & Tubanov, Ts.A. (2021). [Strong earthquakes in the Baikal region in 2020–2021]. In *Razlomoobrazovanie v litosfere i soputstvuiushchie protsessy: tektonofizicheskii analiz: Tezisy докладов Vserossiiskogo soveshchaniia, posviashchennogo pamiati professora S.I. Shermana* [Abstracts of the reports of the All-Russian meeting dedicated to the memory of Professor S.I. Sherman “Faulting in the lithosphere and related processes: tectonophysical analysis”] (pp. 182-183). Irkutsk, Russia: ISU Publ. (In Russ.). EDN: IEJEEX
- Larionov, V.I., Suchshev, S.P., Ugarov, A.N., & Frolova, N.I. (2003). [Seismic risk assessment using GIS-technologies application]. In *Prirodnye opasnosti Rossii. T. 6: Otsenka i upravlenie prirodnymi riskami. Pod red. A.L. Ragozina* [Natural hazards in Russia, Iss. 6 “Natural risk assessment and management”. Ed. A.L. Ragozin] (pp. 209-231). Moscow, Russia: KRUK Publ. (In Russ.). EDN: UXTFOX
- Larionov, V.I., Frolova, N.I., Berzhinsky Yu.A., Berzhinskaya, L.I., & Salandaeva, O.I. (2012). [Assessment of natural and natural-technogenic risks for the Baikal region using GIS technologies]. In *Ekologicheskii risk i ekologicheskaiia bezopasnost': Materialy Tre'tei Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. T. 2* [Proceedings of the Third All-Russian scientific conference with international participation “Environmental risk and environmental safety”. Iss. 2] (pp. 206-208). Irkutsk, Russia: Publ. House of the Institute of Geography named after V.B. Sochavy SB RAS. (In Russ.).
- Larionov, V.I., Frolova, N.I., Ugarov, A.N., Gabsatarova, I.P., Sushchev, S.P., & Malaeva, N.S. (2020a). [Improving the reliability of near real time estimates of losses due to earthquakes on the territory of the Chechen Republic]. In *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza: Kollektivnaia monografiia. T. X (v 2-kh chastiakh). Ch. 2. Nauch. red.: akademik RAN A.O. Gliko, d.f.-m.n., professor I.A. Kerimov* [Collective monograph “Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus”. Vol. X (in 2 parts). Part 2. Eds: Acad. of the RAS, A.O. Gliko, Dr., Prof. I.A. Kerimov] (pp. 145-155). Grozny, Russia: Publ. House “Format LLC”. (In Russ.).
- Larionov, V.I., Frolova, N.I., Ugarov, A.N., Gabsatarova, I.P., Sushchev, S.P., & Malaeva, N.S. (2020b). [Seismic risk management within the AIMS RSChS: the example of the North Caucasus]. *Trudy Instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the RAS], 2(81), 32-46. (In Russ.). DOI: 10.33580/2541-9684-2020-81-2-33-47. EDN: OSXWDA
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Radziminovich, N.A., Masalsky, O.K., & Chechel'nitsky, V.V. (2009). [Seismicity of the Baikal rift zone for the period of digital recording of earthquakes (2001–2006)]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems of Engineering Seismology], 36(1), 40-55. (In Russ.). EDN: KWCDGB
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Radziminovich Ya.B., & Seredkina, A.I. (2014). [The Kultuk earthquake of August 27, 2008 with Mw=6.3, I0=8–9 (South Baikal)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes of the Northern Eurasia, 2008] (pp. 386-407). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: UDUBOV
- Metodika prognozirovaniia posledstviia zemletriasenii* [Methods of the earthquakes consequences forecast] (2000). Moscow, Russia: VNII GOChS-TSIEKS-Seismological Center of IGE RAS Publ., 27 p. (In Russ.).
- Ulomov, V.I., Bogdanov, M.I., Trifonov, V.G., Gusev, A.A., Gusev, G.S., et al. (2016). [General seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-2016. Explanatory note to the set of OSR-2016 maps and a list of settlements located in seismically active zones]. *Inzhenernye izyskaniia* [Engineering Surveys], 7, 49-122. (In Russ.). EDN: WJDTLZ
- Osipov, V.I., Frolova, N.I., Sushchev, S.P., & Larionov, V.I. (2011). [Assessment of seismic and natural risk for the population and territories of the Russian Federation]. In *Ekstremal'nye prirodnye iavleniia i katastrofy: v 2 t. T. 2: Geologiiia urana, geoekologiiia, gliatsiologiiia. Otv. red. V.M. Kotliakov* [Extreme natural phenomena and catastrophes: in 2 volumes. Vol. 2: Geology of uranium, geocology, glaciology. Ed. V.M. Kotlyakov] (pp. 28-48). Moscow, Russia: Publ. House “PROBEL 2000”. (In Russ.). EDN: QKJSGF
- Osipov, V.I., Larionov, V.I., Frolova, N.I., & Ugarov, A.N. (2013). [Evaluation and mapping of seismic and natural risk]. In *Prirodnye riski: analiz, otsenka, kartografirovaniie: Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Proceedings of International scientific conference “Natural risks: analysis, assessment, map-

- ping] (pp. 134-140). Moscow, Russia: Publ. House of Moscow State University. (In Russ.).
- Osipov, V.I., Larionov, V.I., Sushchev, S.P., Frolova, N.I., Ugarov, A.N., Kozharinov, S.V., & Barskaya, T.V. (2015). [Seismic risk assessment of the territory of the B. Sochi City]. *Geoekologiya. Inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology], 1, 3-19. (In Russ.). EDN: TNRMN
- Radziminovich Ya.B., Imaev, V.S., Radziminovich, N.A., Ruzhich, V.V., Smekalin, O.P., & Chipizubov, A.V. (2009). [Effects of the Kultuk earthquake on August 27, 2008 with Mw=6.3 in the near epicenter zone: results of a macroseismic survey]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems of Engineering Seismology], 36(1), 56-71. (In Russ.). EDN: KWCDGL
- Radziminovich, Ya.B., Gileva, N.A., Tubanov, Ts.A., Lukhneva, O.F., Novopashina, A.V., & Tsydypova, L.R. [Macroseismic effects of the Kudarinsky Earthquake on December 9, 2020 (Mw=5.5) in the Middle Baikal]. In *Razlomoobrazovanie v litosfere i soputstvuiushchie protsessy: tektonofizicheskii analiz: Tezisy dokladov Vserossiiskogo soveshchaniia, posviashchennogo pamiati professora S.I. Shermana* [Abstracts of the reports of the All-Russian meeting dedicated to the memory of Professor S.I. Sherman "Faulting in the lithosphere and related processes: tectonophysical analysis"] (pp. 209-210). Irkutsk, Russia: ISU Publ. (In Russ.). (In Russ.). EDN: VJCRXY
- Ruzhich, V.V., Levina, E.A., & Ponomareva, E.A. (2019). [On the possibility and results of the medium-term prediction of dangerous earthquakes in the Baikal region and its role in seismic risk reduction]. In *Riftogenez, orogenez i soputstvuiushchie protsessy: Materialy IV Vserossiiskogo simpoziuma s uchastiem inostrannykh uchennykh, posviashchennogo 90-letiiu so dnia rozhdeniia akademika N.A. Logacheva. Pod red. S.V. Rasskazova, S.P. Priminoi* [Proc. of the IV All-Russian Symposium with the participation of foreign scientists dedicated to the 90th anniversary of Acad. N.A. Logachev. Eds. S.V. Rasskazov, S.P. Primina] (pp. 167-169). Irkutsk, Russia: IEC SB RAS Publ. (In Russ.). EDN: OXXULU
- Sushchev, S.P., Larionov, V.I., & Frolova, N.I. (2010). [Seismic risk assessment and management using GIS Extremum]. In *Problemy zashchity naseleniia i territorii ot chrezvychainykh situatsii: Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of XV International Scientific and Practical Conference "Problems of protecting the population and territories from emergency situations"] (pp. 327-346). Moscow, Russia: VNII GOChS Publ. (In Russ.). EDN: NCHBJR
- Ulomov, V., & Shumilina, L. (1999). *Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniia territorii Rossiiskoi Federatsii – OSR-97. Masshtab 1:8 000 000. Ob"iasnitel'naia zapiska i spisok gorodov i naselednykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh raionakh* [Set of maps of review seismic zoning of the Russian Federation territory – OSR-97. Scale 1:8 000 000. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake prone areas]. Moscow, Russia: UIPE RAS Publ., 57 p. (In Russ.).
- Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N., & Malaeva, N.S. (2018). [Using macroseismic data to improve the reliability of near real time earthquakes loss estimates in the CIS countries]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly. Otv. red. A.A. Malovichko* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proceedings of the XIII International Seismological Workshop. Ed. A.A. Malovichko] (pp. 292-297). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- 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
- Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N., & Malaeva, N.S. (2020). [Calibration of seismic intensity attenuation model by the example of earthquakes in Albania]. *Geoekologiya. Inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology], 5, 62-77. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869780920050033. EDN: FUWMKB
- Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Sushchev, S.P., Ugarov, A.N., & Malaeva, N.S. (2021a). [Calibration of seismic intensity attenuation model for the Balkan region (the 2020 earthquakes in Croatia)]. *Geoekologiya. Inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology], 5, 3-21. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869780921050040. EDN: UPNJQM
- Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Sushchev, S.P., & Malaeva, N.S. (2021b). [Calibration of the model of the geoinformation system «Extremum» for estimating earthquake losses]. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zashchity MChS Belarusi* [Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus], 5(4), 427-446. (In Russ.). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-4.427. EDN: UZMMNE
- Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Sushchev, S.P., & Malaeva, N.S. (2022a). [Calibration of the model of geoinformation system "Extremum" for estimation of losses from earthquakes in the Eastern Zone of the North Caucasus]. *Geoekologiya. Inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineer-

- ing geology, hydrogeology, geocryology], 4, 34-55. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869780922040014. EDN: GNXQQX
- Frolova, N.I., Malaeva, N.S., Ruzhich, V.V., Berzhinskaya, L.P., Levina, E.A., Suchshev, S.P., Larionov, V.I., & Ugarov, A.N. (2022). [Assessment of social and economic parameters of seismic risk: The Angarsk city area]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera* [Geophysical Processes and Biosphere], 21(2), 86-113. (In Russ.). DOI: 10.21455/gpb2022.2-5. EDN: GMSGFT
- Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Lutikov, A.I., Suchshev, S.P., & Malaeva, N.S. (2022). [Seismic risk assessment in the Stavropol Krai territory]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera* [Geophysical Processes and Biosphere], 21(4), In press (In Russ.). DOI: 10.21455/gpb2022.4
- Sherman, S.I., Berzhinsky, Yu.A., Pavlenov, V.A., & Aptikaev, F.F. (2003). *Regional'nye shkaly seismicheskoi intensivnosti* [Regional scales of seismic intensity]. Novosibirsk, Russia: Publ. House of SB RAS, "Geo" Branch, 188 p. (In Russ.). EDN: QKEKXL
- Aguilar-Melendez, A., Pujades, L.G., de la Puente, J., Barbat, A.H., Ordaz S M.G., Natan Gonzalez-Rocha, S., Welsh-Rodriguez C.M., Rodriguez-Loyola, H., Lantada, N., Ibarra, L., Garcha-Elias, A., & Campos Rios, A. (2019). Probabilistic Assessment of Seismic Risk of Dwelling Buildings of Barcelona. Implication for the City Resilience. In *Brunetta, G., Caldarice, O., Tollin, N., Rosas-Casals, M., Morat, J. (eds). Urban Resilience for Risk and Adaptation Governance. Resilient Cities*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-76944-8_13
- Crowley, Y., Colombi, M., Borzi, B., Faravelli, M., Onida, M., Lopez, M., Polli, D., Meoni, F., & Pinho, R. (2009). A comparison of seismic risk maps for Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(1), 149-180. DOI: 10.1007/s10518-008-9100-7
- da Porto, F., Dona, M., Rosti, A., Rota, M., Lagomarsino, S., Cattari, S., Borzi, B., Onida, M., De Gregorio, D., Perelli, F.L., Del Gaudio, C., Ricci, P., & Speranza, E. (2021). Comparative analysis of the fragility curves for Italian residential masonry and RC buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 3209-3252. DOI: 10.1007/s10518-021-01120-1
- Dilley, M., Deichmann, U., Chen, R.S., et al. (2005). *Natural disaster hotspots: A global risk analysis*. Washington DC: World Bank Publications. Retrieved from <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7376>
- Dolce, M., Prota, A., Borzi, B., da Porto, F., Lagomarsino, S., Magenes, G., Moroni, C., Penna, A., Polese, M., Speranza, E., Verderame, G.M., & Zuccaro, G. (2021). Seismic risk assessment of residential buildings in Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 2999-3032. DOI: 10.1007/s10518-020-01009-5
- Frolova, N.I. (2010). Seismic risk assessment and management in the Russian Federation. In *Gliko, A.O., Zavyalov, A.D., Malovichko, A.A., Sobolev, G.A., Ulomov, V.I. (eds). National Seismological Review of Russia (2007–2010)* (pp. 75-91). Moscow, Russia: GC RAS Publ.
- Frolova, N., Larionov, V., Bonnin, J., & Ugarov, A. (2014). Seismic risk cartographic visualization for crisis management. *Geography, Environment, Sustainability*, 7(4), 4-27.
- Frolova, N., Bonnin, J., Larionov, V., & Ugarov, A. (2015). Complexity in seismic risk assessment at different levels with GIS technology application. In *Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., Luino, F. (eds). Engineering Geology for Society and Territory. V. 5* (pp. 381–385). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-09048-1_73
- Giardini, D., Grünthal, G., Shedlock, K.M., & Zhang, P. (1999). The GSHAP global seismic hazard map. *Annali di geofisica*, 42(6). DOI: 10.4401/ag-3784
- Gomez-Zapata, J.C., Brinckmann, N., Harig, S., Zafarir, R., Pittore, M., Cotton, F., & Babeyko, A. (2021). Variable-resolution building exposure modelling for earthquake and tsunami scenario-based risk assessment: an application case in Lima, Peru. *Natural Hazards and Earth System Science*, 21, 3599-3628. DOI: 10.5194/nhess-21-3599-2021
- Haslinger, F., Basil, R.I., Bossu, R., Cauzzi, C., Cotton, F., Crowley, H., Custódio, S., Danciu, L., Locati, M., Michelini, A., Molinari, I., Ottemöller, L., & Parolai, S. (2022). Coordinated and interoperable seismological data and product services in Europe: The EPOS thematic core service for seismology. *Annals of Geophysics*, 65(2), DM213. DOI: 10.4401/ag-8767. OPEN ACCESS
- Jaiswal, K.S., Wald, D.J., & Hearne, M. (2009). Estimating casualties for large earthquakes worldwide using an empirical approach: U.S. Geological Survey Open-File Report of 2009–1136, 78 p. DOI: 10.3133/ofr20091136
- Li, M., Zou, Z., Xu, G., & Shi, P. (2015). Mapping Earthquake Risk of the World. In *Shi, P., Kaspersen, R. (eds). World Atlas of Natural Disaster Risk, IHDP/Future Earth-Integrated Risk Governance Project Series* (pp. 25-39). Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-45430-5_2
- Meroni, F., Squarcinai, Th., Pessina, V., Locati, M., Modica, M., & Zoboli, R. (2017). A damage scenario for the 2012 Northern Italy earthquakes and estimation of the economic losses to residential buildings. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8, 326-341. DOI: 10.1007/s13753-017-0142-9
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., & Mouton, F. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The disaster risk index. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1149-1159. DOI: 10.5194/nhess-9-1149-2009

- Pittore, M. (2015). Focus maps: a means of prioritizing data collection for efficient geo-risk assessment. *Annals of Geophysics*, 58(1), S0107. DOI: 10.4401/ag-6692
- Radziminovich, N.A., Gileva, N.A., Melnikova, V.I., & Ochkovskaya, M.G. (2013). Seismicity of the Baikal rift system from regional network observations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 146-161. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.10.029
- Radziminovich, Y.B., Gileva, N.A., Tubanov Ts.A., Lukhneva, O.F., Novopashina, A.V., & Tcydypova, L.R. (2022). The December 9, 2020, Mw=5.5 Kudara earthquake (Middle Baikal, Russia): Internet questionnaire hard test and macroseismic data analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, 1297-1324. DOI: 10.1007/s10518-021-01305-8
- Rangelov, B. (2006). Seismic risk mapping – state of the art in the PECO countries. Pt. 2. In *Proceedings of Second science conference with international participation*. Varna, Bulgaria. Available at: <http://www.space.bas.bg/astro/SES2006/CD/E8.pdf>
- So, E., & Spence, R. (2013). Estimating shaking-induced casualties and building damage for global earthquake events: a proposed modelling approach. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11, 347-363. DOI: 10.1007/s10518-012-9373-8
- Tyagunov, S., Grunthal, G., Wahlstrom, R., Stempniewski, L., & Zschau, J. (2006). Seismic risk mapping for Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(4), 573-586, DOI: 10.5194/nhess-6-573-2006
- Zaalishvili, V., Burdzieva, O., Kanukov, A., & Melkov, D. (2019). Seismic risk of modern city. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 13, 308-318. DOI: 10.2174/1874836801913010308
- Xin, D., Daniell, J., & Wenzel, F. (2019). Review of fragility analyses for major building types in China with new implications for intensity-PGA relation development. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. DOI: 10.5194/nhess-2019-195. Preprint
- Xu, Z., Wu, S., Dai, E., & Li, K. (2011). Quantitative assessment of seismic mortality risks in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2(1), 83-90. DOI: 10.3969/j.issn.1674-764x.2011.01.012
- Zanini, M.A., Hofer, L., & Pellegrino, C. (2019). A framework for assessing the seismic risk map of Italy and developing a sustainable risk reduction program. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33, 74-93. DOI: 10.1016/j.ijdr.2018.09.012. EDN: NUYCOW
- Zanini, M.A., Hofer, L., Faleschini, F., & Pellegrino, C. (2017). The seismic risk map of Italy. In *Proceedings of the 6th International Workshop on Design in Civil and Environmental Engineering DCEE2017*. Cagliari, Italy.
- Zhang, L., Tao, Z., & Wang, G. (2022). Assessment and determination of earthquake casualty gathering area based on building damage state and spatial characteristics analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67, 102688. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102688. EDN: OTFZZV
- Zuccaro, G. (2004). Inventory and vulnerability of the residential building stock at a national level, seismic risk and socio/economic loss maps. CD-ROM, Naples, Italy. (In Italian).
- Zhongchun, X.U., Shaohong, W.U., et al. (2011). Quantitative Assessment of Seismic Mortality Risks in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2(1), 83-90. DOI: 10.3969/j.issn.1674-764x.2011.01.012
- Wu, Q., & Zhang, X. (2022). The establishment of risk evaluation index system for small- and medium-sized agency bookkeeping companies. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Article ID 8701591, 13 p. DOI: 10.1155/2022/8701591

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

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 at the Department of E9 of the BMSTU, Moscow, Russia. E-mail: garo@esrc.ru

Malaeva Natalya Sergeevna, Engineer of the IEG RAS. Moscow, Russia. E-mail: natashamalaeva@yandex.ru