

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-2>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/43EVN216.pdf>

DOI: 10.15862/43EVN216 (<http://dx.doi.org/10.15862/43EVN216>)

Статья опубликована 28.03.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Борисов В.В. Статистическое моделирование прямых социально-экономических последствий землетрясений в Байкальском регионе // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016)
<http://naukovedenie.ru/PDF/43EVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI:
10.15862/43EVN216

УДК 338.14

Борисов Владислав Викторович¹

ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», Москва, Россия
Ассистент кафедры «Теории и социально-экономической статистики»
E-mail: vladislav.brsv@gmail.com

Статистическое моделирование прямых социально-экономических последствий землетрясений в Байкальском регионе

Аннотация. В работе рассмотрен сейсмический риск как совокупность потенциального сейсмического воздействия, подверженности риску и уязвимости (хрупкости) объектов, подверженных риску. Для каждой составляющей риска автор рассматривает методику их математико-статистического анализа, а также разрабатывает систему статистических показателей, используемые для моделирования сейсмического риска в Байкальском регионе. Оценка потенциального сейсмического воздействия получена с помощью детального сейсмического районирования Байкальского региона – факт возникновения крупного землетрясения рассматривается как неоднородный Пуассоновский точечный процесс. Выявлено, что в Байкальском регионе возможно возникновение крупных землетрясений – магнитудой до 8,56 баллов по шкале Канамори, но вероятность возникновения таких землетрясений низкая – землетрясение с магнитудой свыше 8 баллов происходят в среднем каждые 620 лет. Для оценки уязвимости объектов, подверженных сейсмическому воздействию, построены эконометрические модели зависимости потерь населения и материальных объектов от интенсивности землетрясений. На основании построенных моделей построен прогноз сейсмического риска для г. Иркутска – выявлена возможность наступления негативных последствий от сейсмических событий, однако период повторяемости таких событий превышает 100 лет, а вероятность возникновения равна $1 \cdot 10^{-6}$. В целом социально-экономическая ситуация в городе является устойчивой к потенциальному сейсмическому воздействию.

Ключевые слова: статистическое моделирование; сейсмическая активность; землетрясения; Байкальский регион; точечный процесс; прямые социально-экономические последствия

¹ <https://www.linkedin.com/in/vladislav-borisov-26606776>
https://www.researchgate.net/profile/Vladislav_Borisov
115547, г. Москва, Загорьевский проезд, 9/12, кв. 22

1. Введение

Для обеспечения экологической безопасности, органы государственной власти, организации и население должны заранее определять необходимый набор средств обеспечения безопасности (качество материалов для сооружений, комплекс мер по эвакуации населения, объем средств, необходимых для ликвидации последствий). Принятие обоснованных, социально справедливых и экономически эффективных решений невозможно без комплексного анализ природного и техногенного риска за исследуемый период времени на исследуемой территории.

Особое внимание исследователей приковано к редким событиям, с периодом повторяемости 1 раз в 100-1000 лет, однако приводящим к катастрофическим последствиям. Оценка последствий редких событий затруднена по ряду причин. С одной стороны, специально организованный мониторинг катастроф существует только с начала XX века и по ряду событий еще не набрана достаточная статистика, чтобы описать их с необходимой точностью. С другой стороны, природные и техногенные катастрофы характеризуются вовлечением в событие все большего числа объектов и лавинообразным нарастанием косвенных последствий, как положительных, так и отрицательных, которые тяжело измерить.

В рамках данной работы автором предложены модели оценки составляющих экологического риска, построены эконометрические модели оценки прямого ущерба на примере крупных землетрясений. Сейсмический риск является одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на развитие общества на глобальном уровне. По данным международной базы по бедствиям (EM-DAT)² (1970-2013 гг.) землетрясения занимают четвертое место по частоте возникновения катастроф после наводнений, циклонов и ураганов и составляют 8% от общего числа катастроф. По масштабам последствий землетрясения занимают первое место и вызывают 34% от последствий всех видов катастроф. Более того, землетрясения являются наиболее документированным и измеримым видом катастроф, а значит, исходные данные обеспечивают возможность получения адекватных эконометрических моделей прямого ущерба.

Моделирование сейсмической активности и ее последствий требует тщательного исследования технических характеристик землетрясений и объектов, подверженных сейсмической активности, выявления периодов и характерных волн сейсмической активности, а также определения закономерностей, которым подчиняются социально-экономические последствия отдельного события или группы событий. Особое внимание уделяется землетрясениям, которые могут ощущаться человеком – магнитудой 4+ балла по шкале Канамори, а также удовлетворяющих хотя бы одному из следующих критериев:

- ущерб свыше 1 млн. долл.;
- число погибших – 10+;
- интенсивность по шкале Меркали – X и выше;
- землетрясение вызвало цунами.

Теоретической и методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых по прикладной статистике, статистическому моделированию землетрясений и оценке социально-экономических последствий

² <http://www.emdat.be/>

http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/gar-pdf/Annex2-Loss_Data_and_Extensive_Risk_Analysis.pdf

экологических катастроф. Наибольшее влияние на взгляды автора оказали труды В.Ф. Писаренко, В.А. Зайцева, В.И. Уломова.

Информационную базу исследования составили каталоги землетрясений, публикуемых Международным Сейсмологическим Центром (ISC), Службой геологической съемки США (USGS), а также данные о последствиях землетрясений, публикуемые МЧС России, данные о последствиях землетрясений и объектах, подверженных риску, публикуемые в рамках проектов Международная Стратегия по Уменьшению Опасности Бедствий ООН (UNISDR), Международная база данных по бедствиям (EM-DAT), Глобальная модель землетрясений (GEM), спутниковые данные Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США (NASA). Были использованы данные каталогов с 1900 г., данные о последствиях исторических землетрясений за весь период регистрации, данные об объектах подверженных сейсмическому риску за 2015 год. Все построенные модели обучались на глобальных данных и были использованы для Байкальского региона, в частности Иркутской области.

Статья имеет следующую структуру – во 2 разделе рассмотрена концепция риска катастроф и его составляющие – подверженность риску (раздел 2.1), потенциальное воздействие (раздел 2.2), уязвимость (раздел 2.3). В 3 разделе построена модель возникновения землетрясений в Байкальском регионе. В 4 разделе построены модели прямых социально-экономических последствий землетрясений в Байкальском регионе. В 5 разделе, заключении, представлены ключевые выводы и возможные направления дальнейшей работы по данной теме.

2. Концепция риска и исходные данные

Согласно словарю терминов МЧС³, под **катастрофой** понимается крупная авария, повлекшая за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей либо разрушения, либо уничтожение объектов, материальных ценностей в значительных размерах, ущерб окружающей природной среды.

Риск возникновения катастроф природного или техногенного характера – это в первую очередь возможность возникновения негативных последствий и потери устойчивости социально-экономического и экологического развития общества. Риск возникновения катастроф выражает не только возможный факт природного или антропогенного события (например, землетрясения), но и всю цепочку событий, ему предшествующих и последующих. Таким образом, риск определяется как совокупность 3 составляющих: подверженность риску (exposure), потенциальное воздействие (hazard), уязвимость (хрупкость) (vulnerability / fragility) (рис. 1) [14].

³ http://dic.academic.ru/dic.nsf/emergency/Катастрофа_экологическая

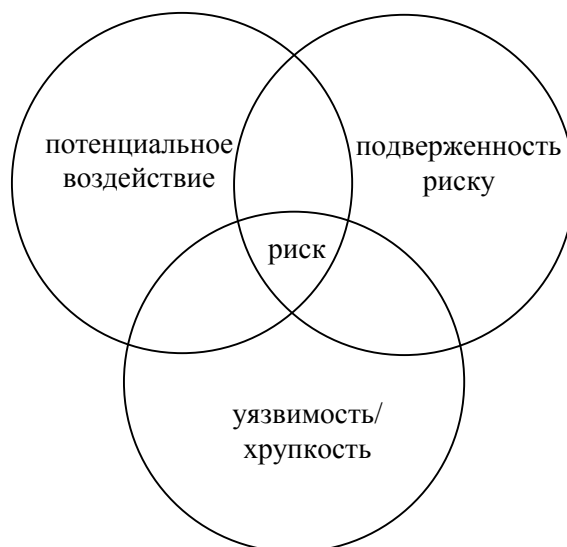


Рисунок 1. Концепция риска

Рассмотрим каждую составляющую риска в отдельности.

2.1. Подверженность риску

Подверженность риску – это совокупность населения и материальных объектов на определенной территории, которой возможно наступление рискованных событий. Анализ данной составляющей применительно к сейсмическому риску позволяет ответить на вопросы:

- Какие объекты подвержены сейсмическому риску?
- Каковы особенности объектов, подверженных сейсмическому риску?
- В какой форме проявляются прямые и косвенные последствия землетрясений на заданной территории?

Поскольку последствия экологических катастроф и в частности землетрясений могут носить прямой и косвенный характер, объекты, подверженные риску целесообразно разделить на объекты, принимающие на себя **прямые последствия**, и объекты, принимающие на себя **косвенные последствия**.

К первой группе относятся потери населения и материальных объектов на исследуемой территории, а также ущерб, непосредственно связанный с землетрясением – страховые выплаты, единовременные денежные пособия пострадавшему населению, затраты на эвакуацию и расселение населения и др. Национальный центр геофизических данных США, а также Международная Стратегия по Уменьшению Опасности Бедствий ООН предусматривают выделение 3 объектов:

- потери населения (чел.);
- разрушенные здания и сооружения (ед.);
- экономический ущерб (млн. долл. США).

Целесообразно выделить несколько степеней поражения населения и повреждения зданий и сооружений. В соответствии с [6] выделяются санитарные потери населения – легкие, средней тяжести и тяжелые, а также безвозвратные потери населения.

К санитарным потерям относят лиц, утративших трудоспособность не менее чем на сутки и поступивших на медицинские пункты или в лечебные учреждения [6].

Безвозвратные потери населения – люди, погибшие в результате чрезвычайных ситуаций, умершие до поступления в медицинское учреждение или на этапах медицинской эвакуации, пропавшие без вести⁴.

МЧС России [3] выделяет 5 степеней повреждения зданий.

- $d = 1$ - слабые повреждения;
- $d = 2$ - умеренные повреждения;
- $d = 3$ - тяжелые повреждения;
- $d = 4$ - частичные разрушения несущих конструкций;
- $d = 5$ - обвалы.

Основной недостаток представленных классификаций в том, что организовать сбор статистических данных с подобной детализацией довольно тяжело, а для целей международных сопоставлений, практически невозможно. По мнению автора, наиболее актуальной является классификация с меньшей детализацией, представленная на рис. 2.

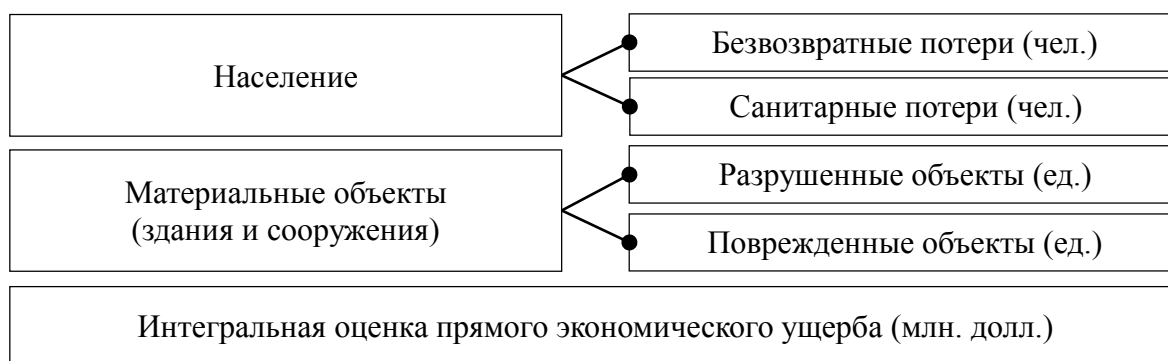


Рисунок 2. Система показателей прямых последствий землетрясений

Безвозвратные и санитарные потери населения на рис.2 соответствуют определению, представленному выше. Показатель числа разрушенных материальных объектов включает все степени повреждения, не подлежащие ремонту ($d = 4, 5$). Число поврежденных объектов соответствует объектам, функционирование которых возможно после ремонта ($d = 1, 2, 3$).

Косвенные последствия землетрясений проявляются через дестабилизацию и нарушение экономических потоков и связей – т.е. сокращение производства, финансовых операций и сделок, изменение уровня и качества жизни населения и т.д. Косвенные последствия не всегда носят негативный характер – например, при повреждении промышленной инфраструктуры одного региона, часть заказов может перейти к предприятиям соседних регионов, что приводит к росту валового регионального продукта этих регионов.

Автором исследования предложена система динамических социально-экономических показателей, отражающая косвенные последствия землетрясений (табл. 1). Для показателей, представленных в табл. 1 выявлено статистически значимое влияние сейсмического риска на динамику показателей для Дальневосточного и Байкальского регионов России. Отметим, что косвенные последствия землетрясений не моделируются в рамках данной работы.

⁴ <http://dic.academic.ru/dic.nsf/emergency/138>

Таблица 1

Система социально-экономических показателей, отражающих косвенные последствия от землетрясений

№ п.п.	Показатель	Единицы измерения
1	Индекс промышленного производства - Раздел D Обрабатывающие производства (только Байкальский регион)	в % к предыдущему месяцу
2	Индекс промышленного производства - Раздел E Производство и распределение электроэнергии, газа и воды (только Дальний Восток)	
3	Объем работ, выполненных по виду деятельности «Строительство»	
4	Изменение средних цен на первичном рынке жилья	
5	Оборот розничной торговли (в сопоставимых ценах)	
6	Индекс физического объема инвестиций в основной капитал (в сопоставимых ценах)	
7	Изменение численности работников, которые находились в отпусках без сохранения заработной платы по заявлению работника	
8	Изменение реальных среднедушевых денежных доходов населения	
9	Изменение объема платных услуг, предоставленных населению	
10	Изменение доходов санаторно-курортных организаций от предоставляемых услуг	
11	Израсходовано средств за отчетный период территориальными фондами обязательного страхования	
12	Израсходовано средств за отчетный период Фондом социального страхования	
13	Поступление средств за отчетный период в Фонд социального страхования	
14	Поступление средств за отчетный период в территориальные фонды обязательного страхования	

2.2. Потенциальное воздействие

Потенциальное воздействие – это вероятность возникновения одного или нескольких рискованных событий, характеризующегося определенными последствиями на определенной территории. Потенциальное воздействие также можно рассматривать как зависимость между характеристиками рискованного события (в случае землетрясений – сила, интенсивность, спектральное ускорение грунта, и т.д.) и вероятностью реализации события с заданными характеристиками.

Основным источником информации о потенциальном сейсмическом воздействии в России являются **общее сейсмическое районирование** (ОСР, пример карты для 2014 г. представлен на рис. 3), детальное сейсмическое районирование и сейсмическое микрорайонирование.

Общее сейсмическое районирование предполагает построение карт сейсмичности и зон возникновения очагов землетрясений на основе данных об исходной региональной сейсмичности (инструментальных, исторических и палеосейсмологических) и геолого-геофизических данных (тектоническое и геодинамическое районирование, геофизические аномалии, космоснимки) [8]. Фундаментальной особенностью всех современных карт ОСР

является вероятностный подход к оценке сейсмической опасности и возможных социально-экономических рисков при возникновении сильных землетрясений.⁵

Сейсмическое районирование проводится для показателей интенсивности и спектрального ускорения грунта. Для построения моделей в данной работе используются показатели магнитуды и интенсивности землетрясения.

Магнитуда землетрясения – условная логарифмическая величина, определяемая по инструментальным наблюдениям сейсмическими станциями и характеризующая общую энергию упругих колебаний, вызванных землетрясениями или взрывами. В работе использована шкала магнитуды по сейсмическому моменту (MW) – шкала Канамори, которая считается наиболее современной энергетической оценкой землетрясений⁶. Сильнейшие из зарегистрированных землетрясений имеют магнитуду 9,5 баллов по шкале Канамори.

Интенсивность землетрясения – сейсмический эффект, оцениваемый в баллах по описательной шкале, основанной на реакции людей, строительных объектов и на изменениях природных объектов⁷. Максимальное значение интенсивности по большинству шкал составляет 12 баллов (в России используется 12-балльная сейсмическая шкала MSK-64).

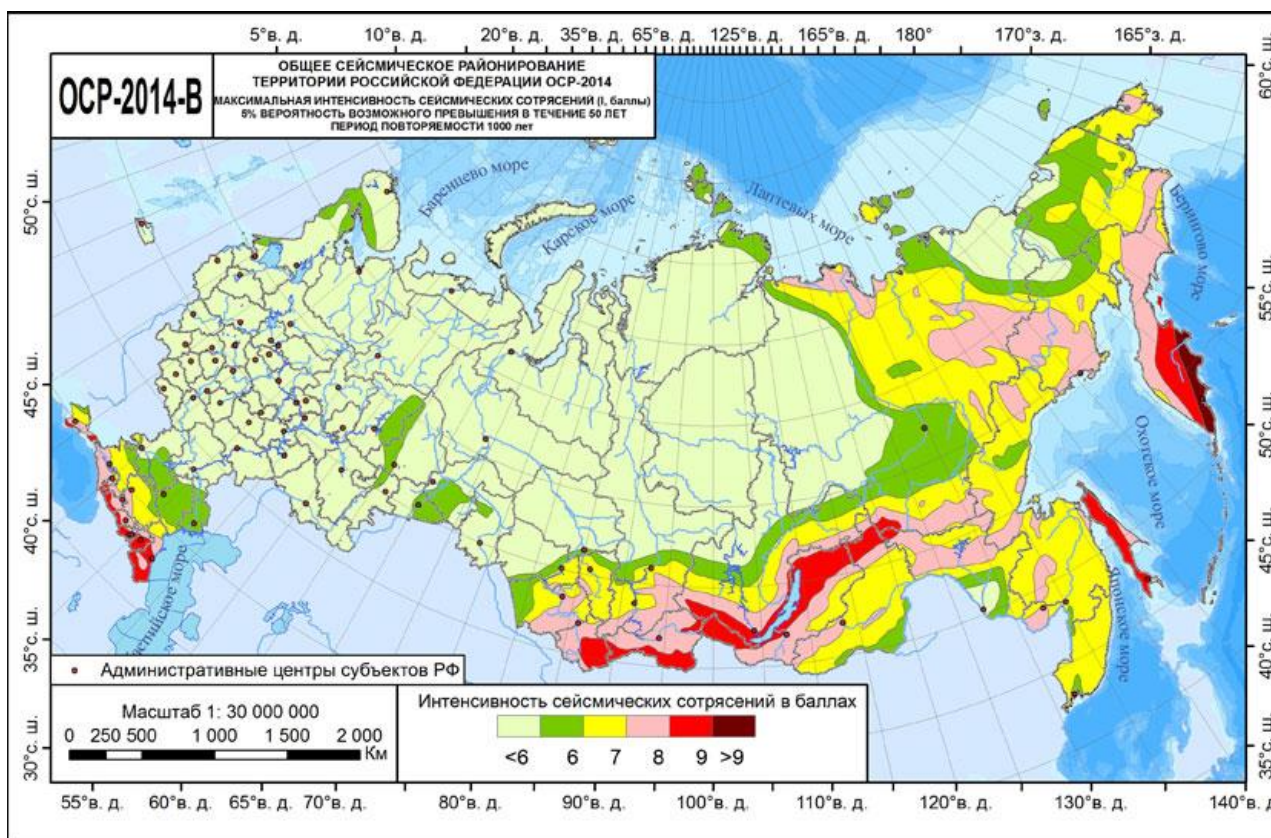


Рисунок 3. Макет карты ОСР-2014-В территории Российской Федерации для периода повторяемости сейсмических воздействий $T=1000$ лет (источник - <http://seismos-u.ifz.ru/personal/2014.htm>)

Для того, чтобы определить потенциальное сейсмическое воздействие в определенном регионе необходимо провести детальное сейсмическое районирование. Поскольку наибольший интерес для исследователя представляют крупнейшие землетрясения, т.е.

⁵ <http://seismos-u.ifz.ru/personal/2014.htm>

⁶ <http://seismorus.ru/eq/scale>

⁷ там же

землетрясения, приходящиеся на «хвост» распределения вероятностей, для детального сейсмического районирования могут быть использованы основные положения теории экстремальных значений. Согласно теоремы Балкемы-Пикандса-де Хаана [11].

Условное распределение превышения случайной величиной X некоторого достаточно высокого порога асимптотически описывается с помощью обобщенного распределения Парето, функция распределения которого имеет вид:

$$F_X(x - \mu | x \geq \mu) = p(X < x - \mu | x \geq \mu) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1/\xi}, & \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right) & \xi = 0 \end{cases}.$$

где: $\mu \in \mathbb{R}$ - параметр сдвига; $\sigma > 0$ - параметр масштаба; $\xi \in \mathbb{R}$ - параметр формы; $\xi > 0$ - соответствует классическому распределению Парето; $\xi = 0$ - экспоненциальному распределению; $\xi < 0$ - распределению Парето тип II, которое ограничено сверху и снизу значениями μ и $\mu - \frac{\sigma}{\xi}$ соответственно.

Возможность использования обобщенного распределения Парето для описания распределения сильнейших землетрясений представлена в работах В.Ф. Писаренко и М.В. Родкина [17, 18], хотя используемый подход имеет ряд недостатков и особенностей, на которые следует обратить внимание [20]:

1. Распределение Парето тип II подходит для описания сейсмических событий, поскольку для определенной территории характеристики землетрясений всегда ограничены сверху. С другой стороны, при $\xi \rightarrow 0-0$, $M_{\max} \rightarrow \infty$, т.е. при малых значениях параметра формы оценка максимумов будет неустойчивой.
2. Наличие «тяжелых хвостов» – причина расходимости моментов распределения, что в свою очередь делает невозможным применение параметрических методов. В результате распределения теряют свойство отсутствия памяти, присущее законам распределения экспоненциального типа (выражается в необходимости корректировать параметр масштаба).
3. На практике приходится иметь дело с нестационарными временными рядами и нарушением допущения об экзогенности параметров, т.е. наличии факторов, оказывающих влияние на параметры распределения.
4. При построении оценок параметров обобщенного распределения Парето применение метода максимального правдоподобия является единственно возможным. Оптимизация функции правдоподобия возможна только численными методами, что ведет к проблеме выбора начальных значений и обосновании сходимости к глобальному экстремуму.

Факт превышения порогового значения (из теоремы Балкемы-Пикандса-де Хаана) можно рассматривать как успех в схеме независимых испытаний Бернулли, с вероятностью $1 - F_X(x)$. Если число событий велико, явление можно рассматривать как неоднородный Пуассоновский точечный процесс [13, 22]. Иными словами, число раз, которое редкое событие E наступит за промежуток времени $[t_1, t_2]$, принадлежит распределению Пуассона с интенсивностью:

$$\lambda = (t_2 - t_1) \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi}.$$

Чтобы оценить вероятность возникновения одного события с определенной интенсивностью достаточно оценить вектор параметров: $\theta = (\lambda, \xi, \mu, \sigma)$.

Оцениваемые параметры можно рассматривать как функции от различных переменных $\lambda = \lambda(x)$, $\xi = \xi(x)$, $\mu = \mu(x)$, $\sigma = \sigma(x)$, в таком случае Пуассоновский процесс будет нестационарным. Действительно, на масштаб и вероятность наступления катастрофических событий могут влиять погодные условия (фактор времени, сезонность), совершенствование технологий, связанные с обеспечением безопасности, природно-климатические и прочие факторы. Например, в работе [2] анализируется влияние интенсивности использования Байкало-амурской магистрали на сейсмическую активность в Байкальском регионе.

2.3. Уязвимость (хрупкость)

Уязвимость – последствия от наступления события для 1 объекта в натуральном или стоимостном выражении. Хрупкость – это вероятность, характеризующая способность быть легко разрушенным или поврежденным. Принципиальное отличие хрупкости от уязвимости в том, что хрупкость характеризует объекты с дискретным числом состояний, уязвимость – с непрерывным числом состояний.

Кривая уязвимости (хрупкости) представляет собой аналитическое выражение зависимости между интенсивностью и вероятностью безвозвратных потерь. Форма зависимости должна соответствовать логике изучаемого явления (подгонка модели по имеющимся данным «в лоб» не приводит к необходимым результатам, рис. 4). Необходимо учитывать дополнительные факторы: экономическое развитие территории, качество построек, плотность застройки, плотность проживания населения, наличие опасных инфраструктурных объектов.

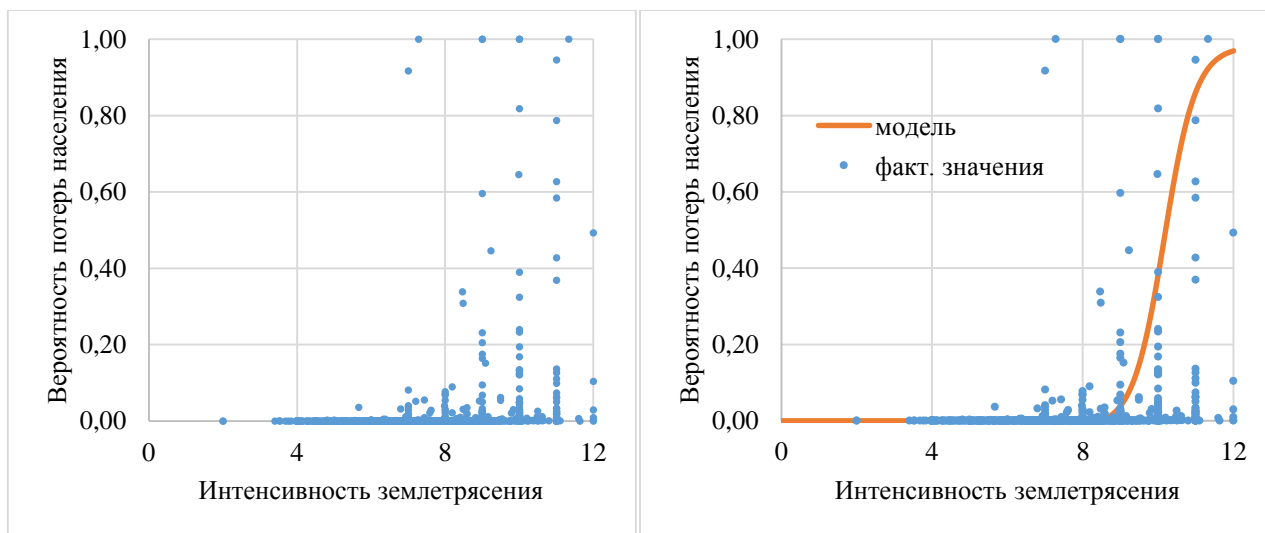


Рисунок 4. Пример подгонки модели зависимости потерь населения от интенсивности землетрясения по историческим данным

По каждому из показателей, представленных на рис. 2 автором исследования предложены следующие модели зависимости последствий от интенсивности землетрясения.

Модель зависимости вероятности **безвозвратных потерь среди населения** от интенсивности землетрясения имеет форму логистической S-кривой (рис. 5). S-кривая соответствует функции логистического распределения, принимает значения от 0 до 1, причем:

- землетрясениям с низкой интенсивностью (0-4 балла по шкале Меркалли) соответствует нулевая вероятность потерь населения;
- начиная с определенного момента (9 баллов на рис. 5) незначительный прирост интенсивности приводит к существенным социально-экономическим последствиям (эффект порогового воздействия);
- при высоких значениях интенсивности (11-12 баллов по шкале Меркалли) большая часть населения уже подвержена сейсмическому воздействию и дальнейшее увеличение интенсивности не приводит к существенному росту безвозвратных потерь населения.



Рисунок 5. Форма зависимости между интенсивностью землетрясения и вероятностью безвозвратных потерь населения (данные условные)

Вероятность безвозвратных потерь населения зависит от социально-экономических условий развития территории, на которой произошло землетрясение. Факторы, использованные в данной модели, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Факторы, учитываемые в модели безвозвратных потерь населения

№ п.п.	Показатель	Сущность показателя	Условное обозначение в модели
1	Размер ВВП на душу населения	Используется в качестве индикатора уровня жизни населения на изучаемой территории.	x_1
2	Фонд жилых зданий и сооружений в стоимостном выражении	Интегральная оценка технических характеристик зданий и сооружений, качества материалов и технологий (в т.ч. антисейсмических), использованных при строительстве, а также плотности застройки, влияющей на возможность организации и проведения спасательных работ.	x_2

№ п.п.	Показатель	Сущность показателя	Условное обозначение в модели
3	Время суток	Позволяет понять, где находилась большая часть населения, чем она была занята в момент возникновения землетрясений. Поскольку распорядок для населения цикличен, время суток учитывается с помощью тригонометрического ряда Фурье: $\hat{y} = a_0 + \sum_k (a_k \cos kt + b_k \sin kt).$	t_1
4	Аналитический тренд	Для сопоставления последствия исторически наблюдавшихся и современных землетрясений. Несопоставимость может быть вызвана совершенствованием технологий предупреждения и ликвидации последствий землетрясений.	t_2

Таким образом, модель зависимости числа безвозвратных потерь населения от интенсивности сейсмического воздействия имеет вид:

$$H_{\sigma} = \sum_k p(\bar{b} | I_k, X_k) \cdot H_k, \quad p(\bar{b} | I_k, X_k) = \frac{\gamma^*}{1 + e^{-\frac{(I_k - \alpha^*)}{\beta^*}}}$$

$$\alpha^* = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) + \alpha_2 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) + \alpha_3 \cdot t_2 + \alpha_4 \cdot x_1 + \alpha_5 \cdot \ln(x_2),$$

$$\beta^* = \beta_0 + \beta_1 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) + \beta_2 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) + \beta_3 \cdot t_2 + \beta_4 \cdot x_1 + \beta_5 \cdot \ln(x_2)$$

$$\gamma^* = (\gamma_0 + \gamma_1 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) + \gamma_2 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) + \gamma_3 \cdot t_2 + \gamma_4 \cdot x_1 + \gamma_5 \cdot \ln(x_2))^2$$

где: H_{σ} - общая численность безвозвратных потерь населения (чел.) в результате землетрясения; H_k - численность населения, подверженного сейсмическому риску на k -ой территории; $p(\bar{b} | I_k, X_k)$ - вероятность безвозвратных потерь населения; I_k - интенсивность сейсмических колебаний на k -ой территории; $X_k = (t_1, t_2, x_1, x_2)$ - факторы, оказывающие влияние на последствия землетрясений (табл. 2). Влияние факторов t_1, t_2, x_1, x_2 на вероятность возникновения безвозвратных потерь населения проявляется через параметры $\alpha^*, \beta^*, \gamma^*$, которые легко интерпретируются как параметры логистической S-кривой:

- α^* - параметр сдвига кривой относительно оси абсцисс, отражает при какой интенсивности наблюдается резкий рост числа безвозвратных потерь населения.
- β^* - параметр формы кривой, показывает насколько выражен эффект порогового воздействия.
- γ^* - параметр масштаба, характеризует максимальный масштаб последствий землетрясения. На данным параметр накладывается ограничение неотрицательности.

Непосредственной оценке подлежит влияние факторов t_1, t_2, x_1, x_2 на параметры $\alpha^*, \beta^*, \gamma^*$ - коэффициенты $\alpha_0, \dots, \alpha_5, \beta_0, \dots, \beta_5, \gamma_0, \dots, \gamma_5$.

Общая численность безвозвратных потерь населения (чел.) в результате землетрясения H_{σ} получается путем суммирования потерь населения для различных территорий,

подверженных сейсмическому риску. В рамках данной работы вся территория разделена на 4 области, находящиеся на разном удалении от эпицентра землетрясения (рис. 6).

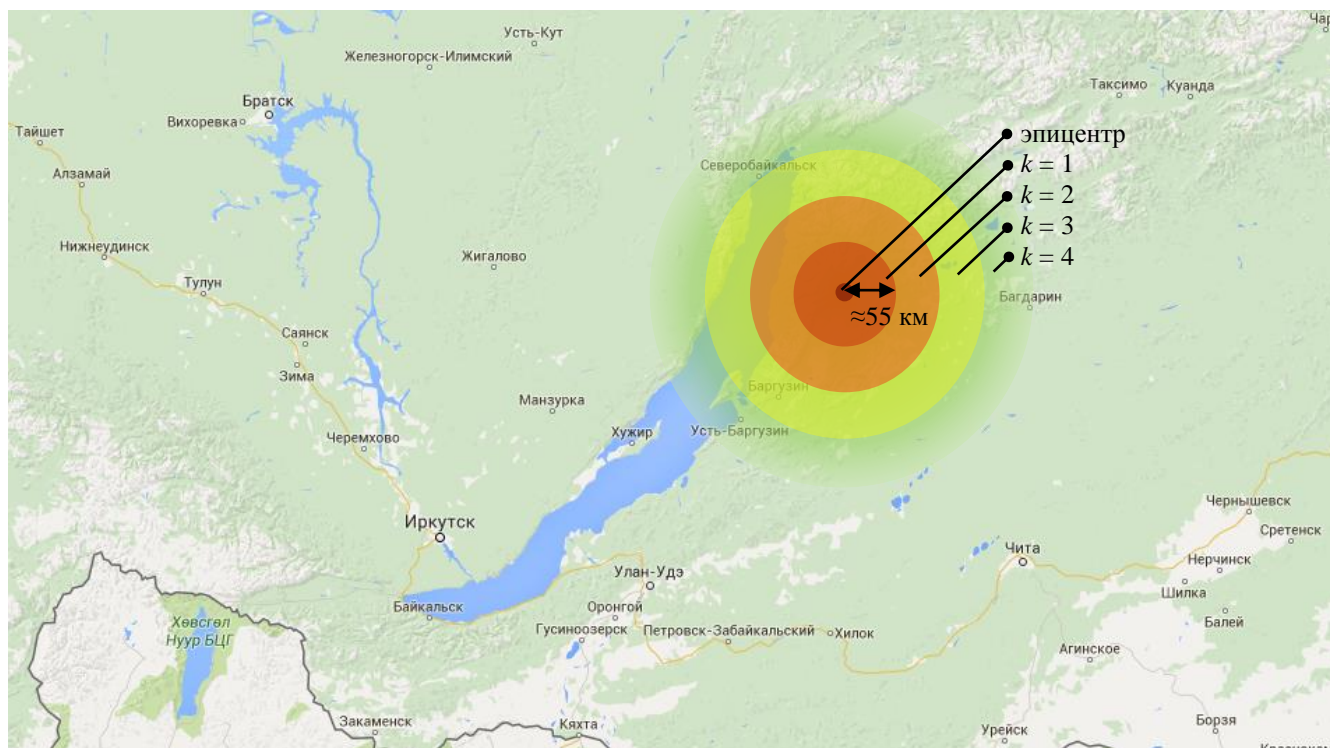


Рисунок 6. Пример разделения территории, подверженной риску в соответствии с расстоянием от эпицентра землетрясения

Для санитарных потерь населения выбрана следующая форма модели:

$$H_c = \sum_k p(c | I_k, X_k) \cdot H_k, \quad p(c | I_k, X_k) = \gamma^* \cdot \frac{\varphi\left(\frac{I - \alpha^*}{\beta^*}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{3 - \alpha^*}{\beta^*}\right)},$$

$$\alpha^* = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) + \alpha_2 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) + \alpha_3 \cdot t_2 + \alpha_4 \cdot \ln(x_1) + \alpha_5 \cdot \ln(x_2)$$

$$\beta^* = \beta_0 + \beta_1 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) + \beta_2 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) + \beta_3 \cdot t_2 + \beta_4 \cdot \ln(x_1) + \beta_5 \cdot \ln(x_2)$$

$$\gamma^* = (\gamma_0 + \gamma_1 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) + \gamma_2 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) + \gamma_3 \cdot t_2 + \gamma_4 \cdot \ln(x_1) + \gamma_5 \cdot \ln(x_2))^2$$

где: H_c - санитарные потери населения, $p(c | I_k, X_k)$ - вероятность санитарных потерь населения, $\varphi(\cdot)$ - плотность стандартного нормального распределения, $\Phi(\cdot)$ - функция стандартного нормального распределения.

Аналитическая форма соответствует плотности усеченного нормального распределения (рис. 6) и отражает следующие статистические закономерности:

- при низких значениях интенсивности (0-3 по шкале Меркалли) санитарные потери населения равны нулю;
- при увеличении интенсивности землетрясения до определенного момента (на рис. 7, 10 баллов по шкале Меркалли) вероятность санитарных потерь увеличивается;

- при высоких значениях интенсивности (11-12 по шкале Меркалли) большая часть санитарных потерь населения переходит в безвозвратные потери – при увеличении интенсивности вероятность санитарных потерь снижается.

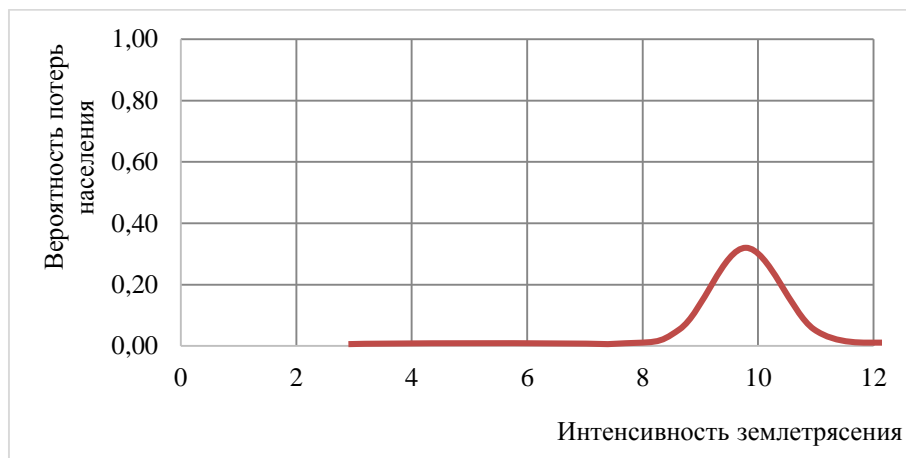


Рисунок 7. Форма зависимости между интенсивностью землетрясения и вероятностью санитарных потерь населения (данные условные)

Для показателей **числа разрушенных и поврежденных зданий и сооружений**, а также **интегральной оценки прямого ущерба** построена экспоненциальная эконометрическая модель с свободным членом.

$$Y = \sum_k (\alpha^* + \beta^* \exp(I_k \cdot \gamma^*))$$

$$\alpha^* = (\alpha_0 + \alpha_1 \cdot t_2 + \alpha_3 \cdot x_3 + \alpha_4 \cdot \ln(x_4) + \alpha_5 \cdot x_5)^2,$$

$$\beta^* = (\beta_0 + \beta_1 \cdot t_2 + \alpha_3 \cdot x_3 + \alpha_4 \cdot \ln(x_4) + \beta_5 \cdot x_5)^2$$

$$\gamma^* = (\gamma_0 + \gamma_1 \cdot t_2 + \alpha_3 \cdot x_3 + \alpha_4 \cdot \ln(x_4) + \gamma_5 \cdot x_5)^2$$

где: x_3 - фонд зданий и сооружений промышленного назначения в стоимостном выражении, $\ln(x_4)$ - объем ВВП данной территории, x_5 - численность населения, проживающего на данной территории.

Выбор экспоненциальной функции обусловлен тем, что при нарастании сейсмического воздействия начиная с определенных значений интенсивности (≈ 8 баллов по шкале Меркалли) экономические последствия возрастают лавинообразно, и все большее число объектов является подверженным сейсмическому воздействию.

α^* , β^* , γ^* представляют собой квадраты линейной комбинации переменных t_2, x_3, x_4, x_5 , поскольку на параметры накладывается ограничение неотрицательности.

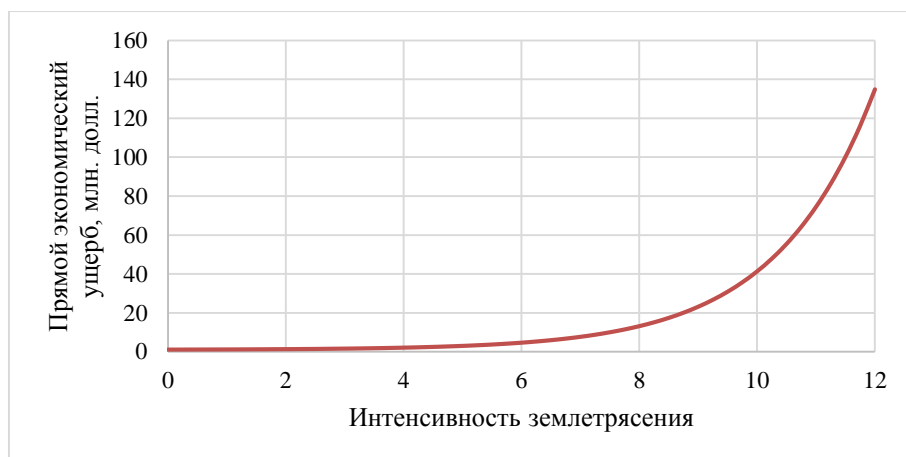


Рисунок 8. Форма зависимости между интенсивностью землетрясения и интегральной оценкой прямого экономического ущерба (данные условные)

3. Моделирование потенциального сейсмического воздействия в Байкальском регионе

Байкальская рифтовая зона относится к территориям с высокой сейсмической активностью – только за последние 15 лет в районе озера Байкал зарегистрировано 371 землетрясение с магнитудой более 3.0, районирование представлено на рис. 1. Наиболее известным землетрясением за всю историю считается Цаганское землетрясение (1861 г.), результатом которого стало образование залива Провал [1].

Источником информации о сейсмической активности на глобальном уровне являются открытые данные каталогов землетрясений Международного Сейсмологического Центра (ISC) и Службы геологической съемки США⁸. База данных Службы геологической съемки США содержит информацию о времени регистрации, географии (широта-долгота, регион), магнитуде (по различным методологиям – проблема), глубине, точности оценки по всем землетрясениям, зарегистрированным с 1900 г.:

- по США с магнитудой -1+;
- по миру с магнитудой 4,5+ (если не указано иное).

В Байкальском регионе землетрясения магнитудой 4 и выше повторяются в среднем каждые 102 дня, причем наибольшая сейсмическая активность наблюдалась в 1999 г. – зарегистрировано 77 фактов сейсмической активности. В 2000-2015 гг. регистрировалось в среднем 12 землетрясений магнитудой 4 балла и выше в год.

Факт возникновения землетрясений рассматривается как неоднородный Пуассоновский точечный процесс. Подгонка распределения вероятностей событий с различной магнитудой осуществлялась в пакете обработки статистических данных R версии 3.2.4⁹. Оценка параметров распределения силы землетрясений проводилась с помощью метода максимального правдоподобия, полученные результаты представлены в табл. 3, качество подгонки кривой представлено на рис. 9. Тест Колмогорова-Смирнова показал, что с доверительной вероятностью, превышающей 0.99 можно принять гипотезу о том, что магнитуда землетрясений в Байкальском регионе имеет обобщенное распределение Парето.

Таблица 3

⁸ <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

⁹ пакет доступен для свободного скачивания на сайте <https://www.r-project.org/>

Оценка параметров распределения силы землетрясений в Байкальском регионе

Обратное значение функции правдоподобия: -3951.377

Оценки параметров:

сдвиг	масштаб	форма
6.705176	0.287828	-0.15506

Среднеквадратические ошибки параметров:

сдвиг	масштаб	форма
0.097421	0.027767	0.020707

Оценка дисперсионно-ковариационной матрицы параметров

	сдвиг	масштаб	форма
сдвиг	9.49E-03	2.25E-03	1.32E-03
масштаб	2.25E-03	7.71E-04	5.51E-04
форма	1.32E-03	5.51E-04	4.29E-04

Информационный критерий Акайке (AIC) = -7896.754

Информационный критерий Байеса (BIC) = -7882.284

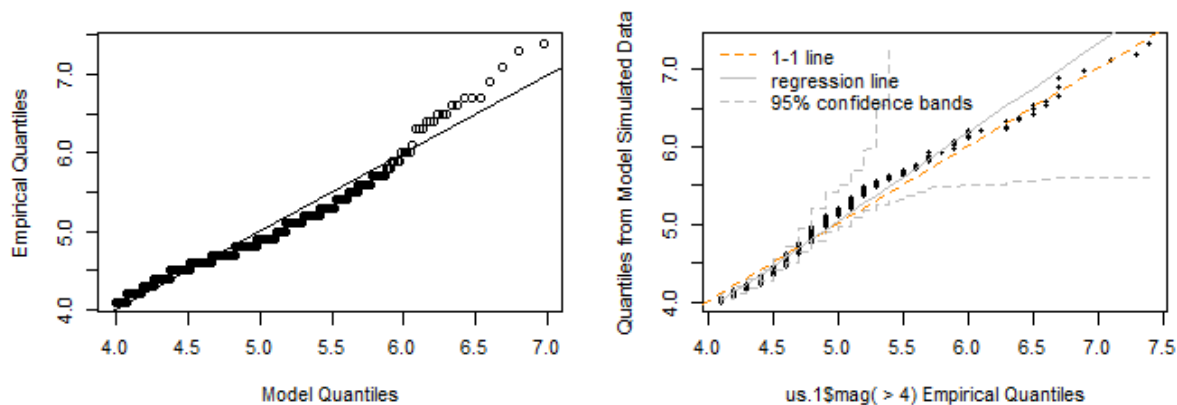


Рисунок 9. Качество подгонки моделей (соотношение эмпирических и теоретических квантилей)

Построенные модели позволили оценить периоды повторяемости и вероятности возникновения крупных землетрясений в Байкальском регионе (табл. 4).

Таблица 4

Периоды повторяемости и вероятности возникновения крупных землетрясений в Байкальском регионе

Показатель	Значение
Интенсивность возникновения землетрясений (число событий за год)	9
Магнитуда, повторяющаяся 1 раз в год	7.24
Магнитуда, повторяющаяся 1 раз в 10 лет	7.64
Магнитуда, повторяющаяся 1 раз в 100 лет	7.91
Квантиль $1-10^{(-2)}$	6.33
Квантиль $1-10^{(-4)}$	7.47
Квантиль $1-10^{(-6)}$	8.03
Максимально возможная магнитуда в	8.56

Показатель	Значение
точке	
Частота повторения квантили $1-10^{(-2)}$ за 10 лет	0.02165
Частота повторения квантили $1-10^{(-4)}$ за 10 лет	0.00022
Частота повторения квантили $1-10^{(-6)}$ за 10 лет	0.000002

Данные табл. 4 позволяют утверждать, что максимально возможная сила землетрясений в Байкальском регионе составляет 8,56 баллов по шкале Канамори – ей соответствует максимальная интенсивность 11,3 балла по шкале Меркалли. Землетрясения с магнитудой свыше 8 баллов происходят в течение 10 лет с вероятностью 0,000002. С вероятностью 0,01 мы можем утверждать, что сила потенциального землетрясения в Байкальском регионе не превысит 6,33.

Подобные оценки были получены с детализацией ≈ 28 км для показателей магнитуда и интенсивности. Для г. Иркутск в частности было получено, что с вероятностью $1 - 10^{(-6)}$ 1 раз в 100 лет возможно появление землетрясений с интенсивностью 4,56 и 1 раз в 1000 лет с интенсивностью 6,98.

4. Моделирование прямых социально-экономических последствий сейсмической активности в Байкальском регионе

В качестве информационного источником данных о потерях населения и материальных объектов в результате сейсмического воздействия была использована база Национального центра геофизических данных США, содержащая данные о магнитуде, интенсивности, регионе, величине ущерба в стоимостном и натуральном выражении и т.д. по 5 000 сейсмическим событиям, удовлетворяющих хотя бы одному из критериев:

- ущерб свыше 1 млн. долл.;
- число погибших – 10+;
- интенсивность по шкале Меркалли – X и выше;
- землетрясение вызвало цунами.

Автором исследования были обработаны данные о населении и материальных объектах, находящихся в зоне сейсмического воздействия, уровне социально-экономического развития территории. Для этого спутниковые данные NASA и проекта GAR UNISDR за 2015 год были экстраполированы на момент возникновения землетрясения.

Оценка коэффициентов моделей, представленных в разделе 2.3 проводится методом максимального правдоподобия. Поскольку модель является нелинейной по параметрам, для максимизации функции правдоподобия используются алгоритмы Ньютона-Рафсона и ВННН (Берндт-Халл-Халл-Хаусман) (для каждой модели был выбран тот, который обеспечивает лучшую сходимость). Использована процедура отбора статистически значимых факторов, основанная на расчете соотношения правдоподобия.

Анализ остатков исходной модели (на рис.10 справа представлены остатки модели для безвозвратных потерь населения) позволил сделать вывод о низком качестве модели. Проблему частично позволяет решить использование робастных оценок. В таком случае

теряется часть информации о наиболее крупных последствиях землетрясений, однако модель может быть использована для прогнозирования.

Рассчитаны М-оценки вида:

$$\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma} = \arg \min_{\alpha, \beta, \gamma} \left(\sum_i \rho(e_i) \right),$$

где $\rho(\cdot)$ - симметричная, положительно определенная функция с минимумом в нуле:

$$\rho(\cdot) = \frac{c^2}{2} \log \left(1 + \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right) \text{ (тип Коши)}$$

После использования робастных оценок, значение информационных критериев Акайке и Байеса снизилось более чем в 2 раза, что соответствует лучшей точности аппроксимации (табл. 5). Улучшилось качество остатков модели (рис. 10 – справа остатки модели после применения робастных оценок).

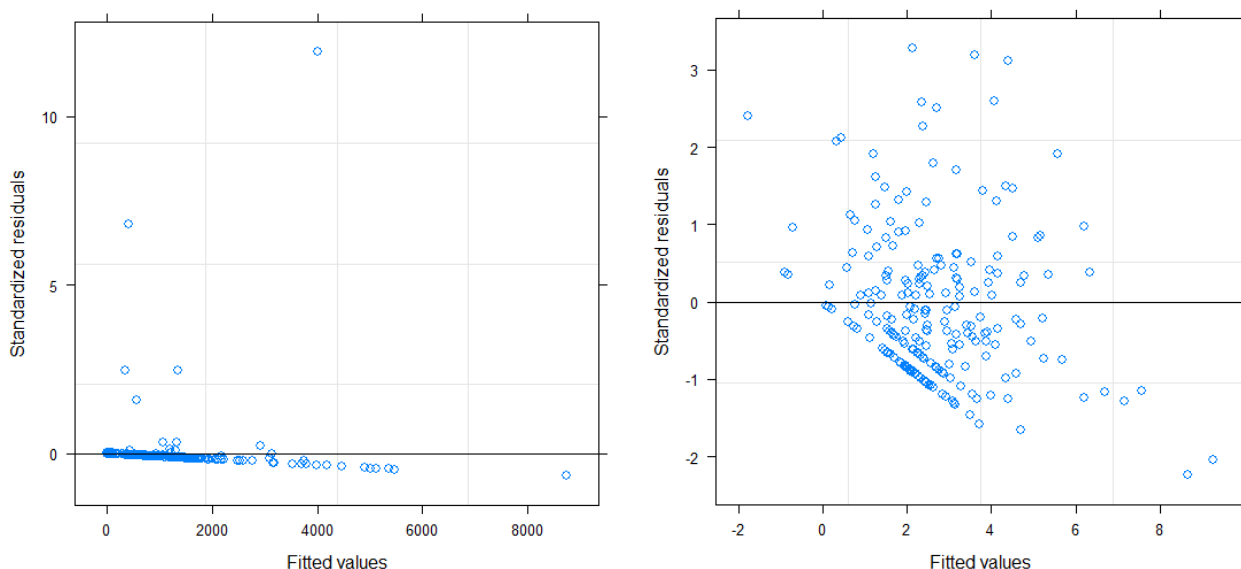


Рисунок 10. Остатки модели безвозвратных потерь населения до (слева) и после (справа) использования робастных оценок

Таблица 5

Качество модели безвозвратных потерь населения до и после использования робастных оценок

	Информационный критерий Акайке	Информационный критерий Байеса
Без использования робастных оценок	6102	6157
С использованием робастных оценок	2722	2776

Таким образом, качество исходных данных является определяющим фактором, ограничивающим возможности моделирования прямых последствий землетрясений. Оценка последствий землетрясений, произошедших до середины XIX в. носила нерегулярный характер. Государственные органы и СМИ часто искусственно занижают или завышают данные о последствиях землетрясений. По мнению автора, основная работа международных организаций в данной сфере должна быть направлена на подготовку актуальной и

объективной информационной базы по возникновению и последствиям различных видов природных и техногенных катастроф.

Построенная модель для развивающихся стран имеет вид:

$$H_{\sigma} = \sum p(\sigma | I, X) \cdot H_i, \quad p(\sigma | I, X) = \frac{\gamma^*}{1 + e^{-\frac{(I - \alpha^*)}{\beta^*}}}$$
$$\alpha^* = 12,3 - 0,5 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) - 0,7 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) + 0,001 \cdot t_2 - 0,04 \cdot \ln(x_1) - 0,07 \cdot \ln(x_2)$$
$$\beta^* = 5,8 - 0,07 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) - 0,07 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) - 0,002 \cdot t_2 + 0,005 \cdot \ln(x_1) - 0,01 \cdot \ln(x_2)$$
$$\gamma^* = (-0,1 + 0,003 \cdot t_2 - 0,004 \cdot \ln(x_1) - 0,03 \cdot \ln(x_2))^2$$

Модель позволила объяснить 66,13% изменчивости изучаемого явления. Это невысокий показатель, однако анализ остатков выявил, что ошибка модели представляет собой «белый шум», а значит в модели учтены все факторы, оказывающие принципиальное влияние на исследуемое явление.

Для остальных рассмотренных объектов, построены следующие модели:

Санитарные потери населения (объясняющая сила модели = 75,59%).

$$H_c = \sum p(\sigma | I, X) \cdot H_i, \quad p(\sigma | I, X) = \gamma^* \cdot \frac{\varphi\left(\frac{I - \alpha^*}{\beta^*}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{3 - \alpha^*}{\beta^*}\right)}$$
$$\alpha^* = 50,7 - 0,2 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) - 0,6 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) - 0,02 \cdot t_2 + 0,02 \cdot \ln(x_1) - 0,06 \cdot \ln(x_2)$$
$$\beta^* = 11,9 - 0,04 \cdot \sin(2\pi \cdot t_1) - 0,2 \cdot \cos(2\pi \cdot t_1) - 0,005 \cdot t_2 + 0,001 \cdot \ln(x_1) - 0,04 \cdot \ln(x_2)$$
$$\gamma^* = (0,7 - 0,0002 \cdot t_2 - 0,004 \cdot \ln(x_1) + 0,008 \cdot \ln(x_2))^2$$

Число разрушенных зданий и сооружений (объясняющая сила модели = 82,25%).

$$Z_p = \sum (\alpha^* + \beta^* \exp(I \cdot \gamma^*))$$
$$\alpha^* = 0$$
$$\beta^* = \left(-0,1 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot t_2 - 0,0006 \cdot \ln(x_1) - 0,06 \cdot x_3 - 0,06 \cdot 10^{-6} \cdot x_4\right)^2$$
$$\gamma^* = \left(0,76 + 0,0001 \cdot t_2 + 0,007 \cdot \ln(x_1) + 0,69 \cdot x_3 - 0,01 \cdot 10^{-6} \cdot x_4\right)^2$$

Число поврежденных зданий и сооружений (объясняющая сила модели = 86,51%).

$$Z_n = \sum (\alpha^* + \beta^* \exp(I \cdot \gamma^*))$$
$$\alpha^* = 0$$
$$\beta^* = \left(-0,1 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot t_2 - 0,0006 \cdot \ln(x_1) - 0,29 \cdot x_3 - 0,06 \cdot 10^{-6} \cdot x_4\right)^2$$
$$\gamma^* = \left(0,98 + 0,008 \cdot \ln(x_1) + 0,54 \cdot x_3 - 0,01 \cdot 10^{-6} \cdot x_4\right)^2$$

Интегральная оценка прямого экономического ущерба (объясняющая сила модели = 72,25%).

$$Y = \sum (\alpha^* + \beta^* \exp(I \cdot \gamma^*))$$
$$\alpha^* = (12,6 - 0,007 \cdot t_2 - 0,03 \cdot \ln(x_1) + 10 \cdot x_3 - 0,22 \cdot 10^{-6} \cdot x_4)^2$$
$$\beta^* = (0,02 + 0,0001 \cdot \ln(x_1) - 0,09 \cdot x_3 + 0,08 \cdot 10^{-6} \cdot x_4)^2$$
$$\gamma^* = (-4,8 + 0,003 \cdot t_2 + 0,002 \cdot \ln(x_1) + 1,7 \cdot x_3 - 0,07 \cdot 10^{-6} \cdot x_4)^2$$

На основании построенных моделей для были построены сценарные прогнозы прямых экономических последствий для г. Иркутска (рис. 11-15).

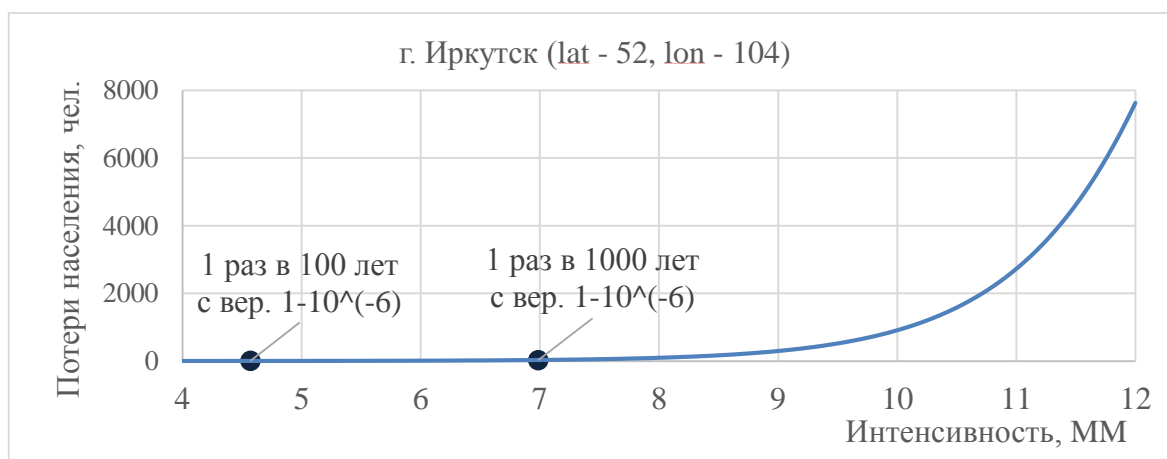


Рисунок 11. Модель зависимости безвозвратных потерь населения (чел.) от интенсивности землетрясений для г. Иркутска

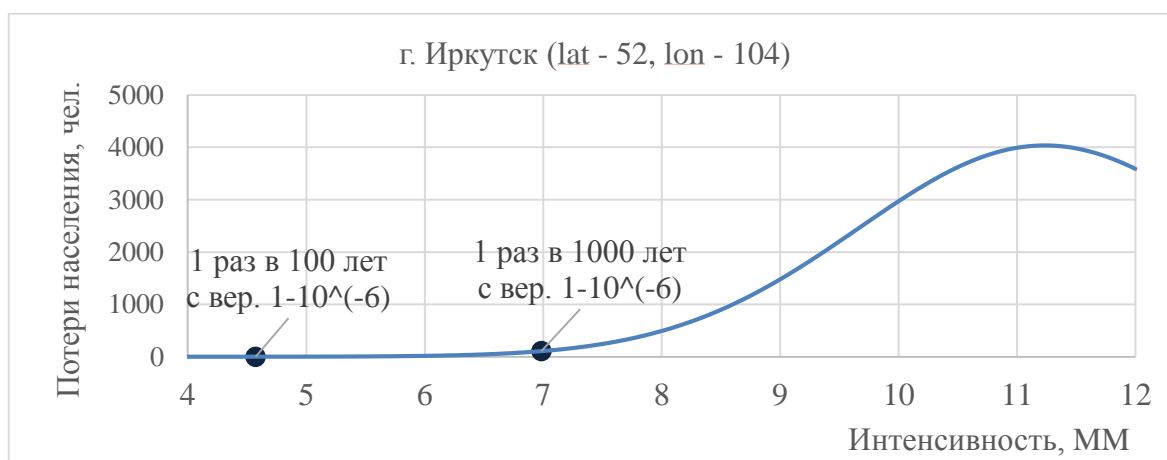


Рисунок 12. Модель зависимости санитарных потерь населения (чел.) от интенсивности землетрясений для г. Иркутска

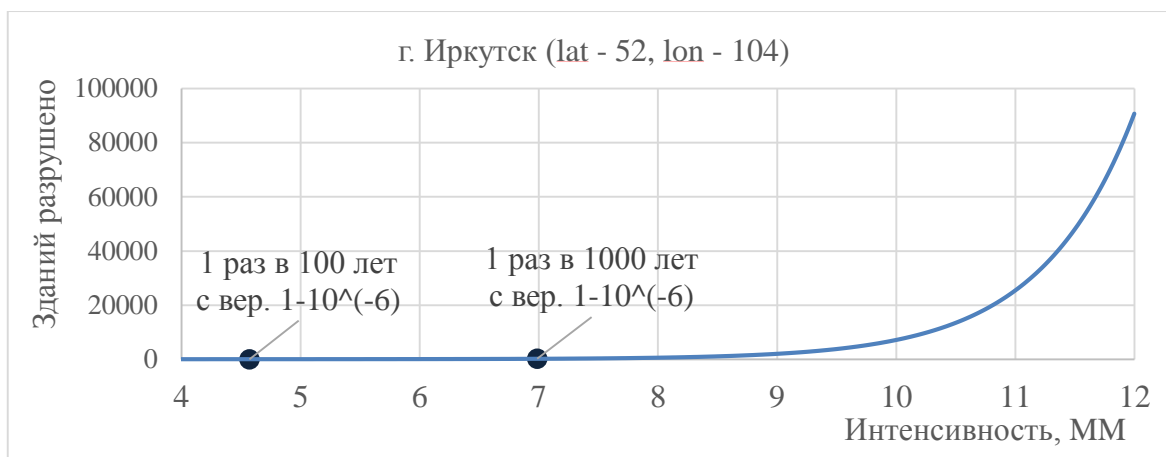


Рисунок 13. Модель зависимости числа разрушенных зданий и сооружений от интенсивности землетрясений для г. Иркутска

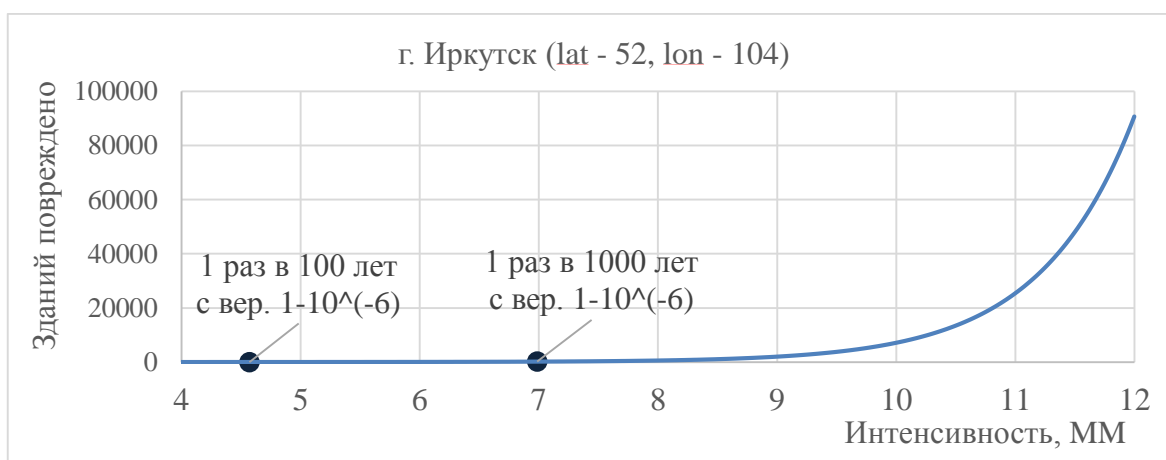


Рисунок 14. Модель зависимости числа поврежденных зданий и сооружений от интенсивности землетрясений для г. Иркутска

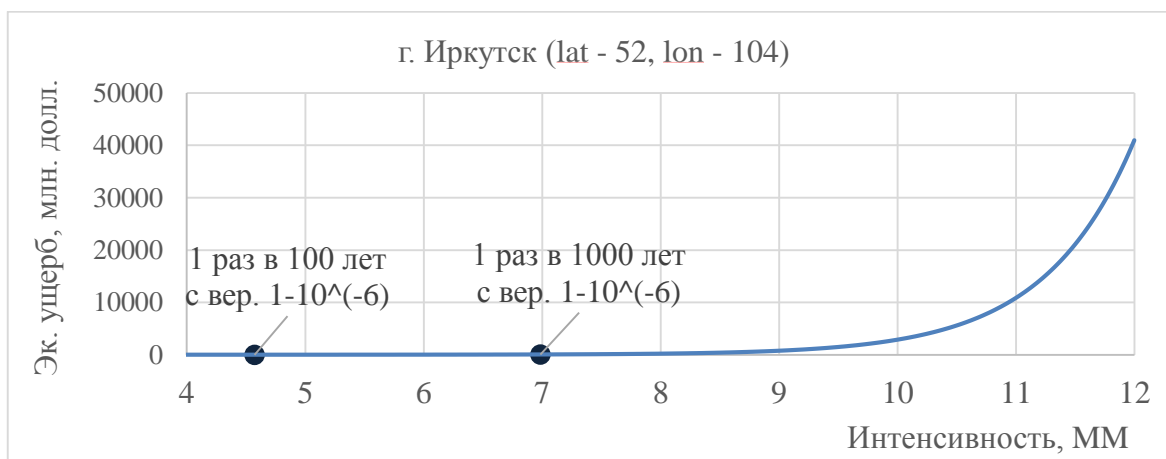


Рисунок 15. Модель зависимости интегрального прямого экономического ущерба от интенсивности землетрясений для г. Иркутска

Отметим, что для г. Иркутска возможно наступление негативных последствий от сейсмической активности, однако период повторяемости таких событий превышает 100 лет, а вероятность возникновения равна $1-10^{-6}$. Отмеченные точки лежат в области кривых, когда прирост интенсивности не приводит к резким изменениям функций уязвимости, а значит

социально-экономическая сфера является устойчивой к потенциальному сейсмическому воздействию в регионе.

5. Заключение

Данная работа базируется на концепции риска как совокупности потенциального воздействия, подверженности риску и уязвимости (хрупкости). Для каждой составляющей риска на примере сейсмической активности рассмотрена методика статистического анализа этой составляющей, а также разработаны системы статистических показателей.

Рассмотрен математико-статистический подход к проведению детального сейсмического районирования, на основании которого получена модель зависимости вероятности возникновения землетрясений различной магнитуды и интенсивности для Байкальского региона. В регионе возможно возникновение крупных землетрясений – магнитудой до 8,56 баллов по шкале Канамори и интенсивностью до 11,3 баллов по шкале Меркалли, но вероятность возникновения таких землетрясений крайне низкая – землетрясения с магнитудой свыше 8 баллов происходят в среднем каждые 620 лет.

Следующим этапом анализа сейсмической активности в Байкальском регионе будет более точное тестирование стационарности параметров интенсивности, формы и масштаба. Также для повышения качества модели могут быть использованы данные геодинамического районирования.

Построены модели оценки социально-экономических последствий землетрясений для населения, материальных объектов (зданий и сооружений) и интегрального прямого экономического ущерба, на основании которых дается оценка сейсмического риска для г. Иркутска. Отметим, что сейсмическая обстановка в Иркутске является спокойной, однако возможно наступление негативных последствий от сейсмической активности. Социально-экономическая ситуация в городе является устойчивой к сейсмическому воздействию и даже увеличение сейсмической опасности региона на 1-2 балла по шкале Меркалли не приведет к значительным социально-экономическим последствиям.

По мнению автора, дальнейшие исследования данной темы должны быть направлены в первую очередь на совершенствование информационной базы данных о возникновении землетрясений и их социально-экономических и экологических последствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арчимаева Ю.А., Эрдынеева Э.А. Экономические и экологические проблемы озера Байкал // Редакционная коллегия. – 2014. – С. 24.
2. Брыксин А.А., Селезнев В.С. Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – №3. – С. 399-405.
3. Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: учеб. метод. пособие / сост. П.А. Щепин, С.В. Метлушин, С.В. Урванцева, С.В. Ширококов, Д.Р. Мерзлякова. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2011. – 112 С.
4. Зарова Е.В. Оперативный мониторинг в структуре региональных ситуационных центров социально-экономического развития / отв. ред. Е.В. Зарова. Москва: ФГБОУ ВПО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», 2013. – 152 С.
5. Мельникова В.И. и др. О возможности возникновения сильных землетрясений в западном Забайкалье // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8–13 декабря 2014 г.) – 2014. – С. 194-197.
6. Организация медицинской службы гражданской обороны Российской Федерации. Учебник / Под редакцией Ю.И. Погодина, В.С. Трифонова. - Москва, 2005. – 168 С.
7. Петрова Е.Г. Социальные, экономические и экологические последствия землетрясения и цунами 11 марта 2011 года в Японии // ББК 20.1 П 78. – 2012. – 310 С.
8. Уломов В.И. К вопросу о стандартизации норм и правил сейсмического районирования для сейсмостойкого строительства в Российской Федерации // Инженерные изыскания. – 2015. - №10-11. – С. 6-17.
9. Baker J.W. An introduction to probabilistic seismic hazard analysis //White Paper Version. – 2013. – Т. 2. – №1. – С. 79.
10. Borisov V. Risk assessment of accidents on major hydroelectric power stations on a global scale // Modernization of economics and social spheres in Russia and CIS Countries; Quantitative Research Methods: International Scientific Conference Proceedings, December 4-6, 2013. - М.: Plekhanov Russian University of Economics.
11. Brodin, E., Rootzén, H. Univariate and bivariate GPD methods for predicting extreme wind storm losses. Insurance: Mathematics and Economics, Elsevier. – 2009.
12. Crowley, H., Monelli, D., Pagani, M., Silva, V., Weatherill, G., and Rao, A. The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) Technical Report 2015-03. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.1.3/01, 127 PP. – 2015.
13. Goodwin, P., & Wright, G. The limits of forecasting methods in anticipating rare events. Technological Forecasting and Social Change, 77(3). – 2010. – PP. 355–68.
14. Gumbel E.J. Statistics of extremes. – Courier Corporation. – 2012.
15. Porter K.P.E. A Beginner’s Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. – 2014.

16. Pagani M. et al. OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model // *Seismological Research Letters*. – 2014. – Т. 85. – №3. – С. 692-702.
17. Pisarenko V.F. et al. Characterization of the Tail of the Distribution of Earthquake Magnitudes by combining the GEV and GPD descriptions of Extreme Value Theory // *Pure and Applied Geophysics*. – 2014. – Т. 171. – №8. – PP. 1599-1624.
18. Pisarenko V.F., Rodkin M.V. *Statistical Analysis of Natural Disasters and Related Losses*. – Springer. – 2014.
19. Pranov B.M. About use extreme statistics in problems of technospheric safety, *Safety Technologies and Systems*, 6 (34). – 2010.
20. Raschke M. Comment on Pisarenko et al." Characterization of the Tail of the Distribution of Earthquake Magnitudes by Combining the GEV and GPD Descriptions of Extreme Value Theory" // *arXiv preprint arXiv:1501.00937*. – 2015.
21. Rodkin M.V., Pisarenko V.F., Ngo Thi Lu, Rukavishnikova T.A. On potential representations of the distribution law of rare strongest earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (4), 893–904. doi:10.5800/ GT-2014-5-4-0161. – 2014.
22. Smith R.L. *Statistics of extremes, with applications in environment, insurance, and finance* // *Monographs on Statistics and Applied Probability*. – 2004. – Т. 99. – PP. 1-78.

Borisov Vladislav Viktorovich

Plekhanov Russian University of Economics, Russia, Moscow

E-mail: vladislav.brsv@gmail.com

Statistical modelling of direct social and economic aftermath of earthquakes in Lake Baikal region

Abstract. The paper considers seismic risk as combination of seismic hazard, exposure and vulnerability (fragility). For each risk component, methodology of mathematical and statistical analysis is discussed as well as system of statistical indicators is developed. It is shown that analyzed approach might be successfully utilized to estimate and predict seismic risk in the Lake Baikal region. To assess seismic hazard in Lake Baikal region detailed seismic zoning was carried out and the major earthquake occurrences were considered as nonhomogeneous Poisson point process. One might suggest that major earthquakes (up to 8.56 on a MW scale) are possible in the region, but are extremely rare (8 on a MW scale is exceeded once every 620 years). To assess vulnerability functions econometric models for population injuries and deaths and buildings damaged and destroyed against Modified Mercalli intensity are built. Models are used to forecast seismic risk in Irkutsk city; it is concluded that negative consequences of the seismic events are again possible, but highly improbable (once every 100 years and less frequent with $1 \cdot 10^{-6}$ probability). Overall socio-economic situation in the city is resistant to potential earthquakes.

Keywords: statistical modelling; seismic activity; earthquakes; Lake Baikal region; point process; direct social and economic losses

REFERENCES

1. Archimaeva Yu.A., Erdyneeva E.A. Ekonomicheskie i ekologicheskie problemy ozera Baykal // Redaktsionnaya kollegiya. – 2014. – S. 24.
2. Bryksin A.A., Seleznev V.S. Vliyaniye tekhnogennykh faktorov na seysmichnost' rayonov Kuzbassa i ozera Baykal // Geologiya i geofizika. – 2012. – T. 53. – №3. – S. 399-405.
3. Edinaya gosudarstvennaya sistema preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy: ucheb. metod. posobie / sost. P.A. Shchepin, S.V. Metlushin, S.V. Urvantseva, S.V. Shirobokov, D.R. Merzlyakova. Izhevsk: Izd-vo «Udmurtskiy universitet», 2011. – 112 S.
4. Zarova E.V. Operativnyy monitoring v strukture regional'nykh situatsionnykh tsentrov sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya / otv. red. E.V. Zarova. Moskva: FGBOU VPO «REU im. G.V. Plekhanova», 2013. – 152 S.
5. Mel'nikova V.I. i dr. O vozmozhnosti vozniknoveniya sil'nykh zemletryaseniy v zapadnom Zabaykal'e // Geofizicheskie metody issledovaniya zemnoy kory: Materialy Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.N. Puzyreva (Novosibirsk, 8–13 dekabrya 2014 g.) – 2014. – S. 194-197.
6. Organizatsiya meditsinskoy sluzhby grazhdanskoy oborony Rossiyskoy Federatsii. Uchebnik / Pod redaktsiyey Yu.I. Pogodina, B.C. Trifonova. - Moskva, 2005. – 168 C.

7. Petrova E.G. Sotsial'nye, ekonomicheskie i ekologicheskie posledstviya zemletryaseniya i tsunami 11 marta 2011 goda v Yaponii // BKB 20.1 P 78. – 2012. – 310 S.
8. Ulomov V.I. K voprosu o standartizatsii norm i pravil seysmicheskogo rayonirovaniya dlya seysmiostoykogo stroitel'stva v Rossiyskoy Federatsii // Inzhenernye izyskaniya. – 2015. - №10-11. – S. 6-17.
9. Baker J.W. An introduction to probabilistic seismic hazard analysis //White Paper Version. – 2013. – Т. 2. – №1. – S. 79.
10. Borisov V. Risk assessment of accidents on major hydroelectric power stations on a global scale // Modernization of economics and social spheres in Russia and CIS Countries; Quantitative Research Methods: International Scientific Conference Proceedings, December 4-6, 2013. - M.: Plekhanov Russian University of Economics.
11. Brodin, E., Rootzén, H. Univariate and bivariate GPD methods for predicting extreme wind storm losses. Insurance: Mathematics and Economics, Elsevier. – 2009.
12. Crowley, H., Monelli, D., Pagani, M., Silva, V., Weatherill, G., and Rao, A. The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) Technical Report 2015-03. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.1.3/01, 127 PP. – 2015.
13. Goodwin, P., & Wright, G. The limits of forecasting methods in anticipating rare events. Technological Forecasting and Social Change, 77(3). – 2010. – PP. 355–68.
14. Gumbel E.J. Statistics of extremes. – Courier Corporation. – 2012.
15. Porter K.P.E. A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. – 2014.
16. Pagani M. et al. OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model // Seismological Research Letters. – 2014. – Т. 85. – №3. – S. 692-702.
17. Pisarenko V.F. et al. Characterization of the Tail of the Distribution of Earthquake Magnitudes by combining the GEV and GPD descriptions of Extreme Value Theory // Pure and Applied Geophysics. – 2014. – Т. 171. – №8. – PP. 1599-1624.
18. Pisarenko V.F., Rodkin M.V. Statistical Analysis of Natural Disasters and Related Losses. – Springer. – 2014.
19. Pranov B.M. About use extreme statistics in problems of technospheric safety, Safety Technologies and Systems, 6 (34). – 2010.
20. Raschke M. Comment on Pisarenko et al." Characterization of the Tail of the Distribution of Earthquake Magnitudes by Combining the GEV and GPD Descriptions of Extreme Value Theory" // arXiv preprint arXiv:1501.00937. – 2015.
21. Rodkin M.V., Pisarenko V.F., Ngo Thi Lu, Rukavishnikova T.A. On potential representations of the distribution law of rare strongest earthquakes. Geodynamics & Tectonophysics 5 (4), 893–904. doi:10.5800/GT-2014-5-4-0161. – 2014.
22. Smith R.L. Statistics of extremes, with applications in environment, insurance, and finance // Monographs on Statistics and Applied Probability. – 2004. – Т. 99. – PP. 1-78.